



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR
Engenharia

Monitorização da degradação de estruturas de betão armado com recurso a sondas eletroquímicas

Pedro Manuel Gonçalves Silva Romano

Tese para obtenção do Grau de Doutor em
Engenharia Civil
(3º ciclo de estudos)

Orientador: Prof. Doutor Paulo Sérgio Duque de Brito
Coorientador: Prof. Doutor João Castro Gomes

Covilhã, Janeiro de 2020

Dedicatória

Aos meus pais,
que me ensinaram a olhar para a linha do horizonte,
não para as pedras do caminho...

Agradecimentos

Com a conclusão deste trabalho quero agradecer a todos aqueles que contribuíram para que este caminho chegasse ao fim.

Ao meu orientador, o Prof. Paulo Brito, pela determinação com que me apoiou e orientou, mas acima de tudo, pela forma inspiradora e estimulante com que encara o trabalho de investigação.

Ao meu coorientador, o Prof. João Castro Gomes, pela forma altruísta como me acolheu na sua Universidade e se disponibilizou para me orientar na realização desta tese.

A todos os meus colegas e amigos que, das mais diversas formas, contribuíram para que este trabalho fosse possível.

À minha mulher, Ana Paula, e às minhas filhas, Ana Isabel, Francisca e Catarina, porque são elas a origem da energia que me move em todos os desafios.

Aos meus irmãos pelo apoio incondicional que colocam em tudo o que me proponho fazer.

O presente trabalho contou com o apoio financeiro dos projetos RITECA, “Red de Investigación Transfronteriza de Extremadura, Centro y Alentejo”, (POCTEC - 0318_RITECA_4_E, 2008) e INNOACE, “Innovación abierta e inteligente en la EUROACE”, (Interreg V-A Espanha-Portugal - POCTEP - 0049_INNOACE_4_E).

A todos muito obrigado.

Resumo

As construções de betão armado, apesar de todos os desenvolvimentos tecnológicos entretanto alcançados, apresentam uma durabilidade limitada no tempo devido à sua interação com o meio envolvente. Em geral, os projetos de estruturas tendem a definir o horizonte de 50 anos para a sua vida útil e, em casos excecionais pelo custo ou relevância da obra, 100 anos de vida útil. Embora exista um enquadramento legal que define os critérios a adotar para atingir esses objetivos de durabilidade, são muitos os exemplos de envelhecimento precoce de edifícios e infraestruturas, o que se traduz em elevados custos económicos e sociais, resultantes da necessidade de efetuar obras de reparação não previstas ou pela redução dos níveis de serviço disponibilizados. Uma forma de mitigar os efeitos do envelhecimento das estruturas pode ser a implementação de sistemas de gestão da manutenção que permitam detetar problemas e efetuar reparações através da sua deteção precoce, visando incrementar a sua vida útil. A digitalização do setor da construção, designadamente pela introdução da metodologia BIM para gerir todo o processo construtivo, pode ser a chave para ancorar novos modelos e sistemas de gestão da manutenção. Neste cenário, a monitorização da degradação das estruturas com sensores permitirá recolher informação integrável em ferramentas de manutenção interligadas a modelos 3D e à base de dados dos edifícios.

O foco desta tese é a análise e tratamento de informação sobre o estado de degradação de estruturas de betão armado, obtidos com o auxílio de sistemas de monitorização eletroquímica que recorrem a sondas embebidas no betão, para posterior integração em ferramentas de gestão da manutenção, com o objetivo de identificar processos que indiquem a possibilidade do desenvolvimento de fenómenos de degradação do betão ou de corrosão das armaduras nele inseridas. Os sistemas utilizados, de natureza eletroquímica, permitem avaliar alterações ao nível da condutividade iónica do betão, resultantes da sua contaminação química, e fenómenos de corrosão das armaduras, que ocorrem em fases avançadas do processo de degradação.

A metodologia adotada envolveu a realização de ensaios em laboratório e a monitorização de um equipamento em operação numa ETAR. Em laboratório foram efetuadas duas séries de ensaios com provetes de betão armado. O primeiro grupo de provetes foi sujeito à ação de cloretos e o segundo grupo exposto ao ataque por sulfatos de sódio e magnésio. Na ETAR testou-se o funcionamento do sistema de monitorização da resistividade iónica do betão sujeito à ação de águas residuais urbanas em três zonas com diferentes exposições. Nos provetes ensaiados em laboratório adotaram-se quatro soluções diferentes para o reforço do betão, armaduras correntes sem proteção e pintadas com tinta acrílica e armaduras protegidas catodicamente por galvanização e por corrente imposta.

Todos os provetes foram monitorizados com dois sistemas de monitorização eletroquímica. O primeiro sistema recorre a sondas que medem a resistividade iónica do betão e é constituído por um par de eléctrodos iguais, com 30 mm de diâmetro e 50 mm de altura, colocados de forma a ficarem afastados entre si de 50 mm. O outro sistema é composto por um único bloco que integra a ligação à armadura do provete, dois eléctrodos de referência (grafite), dois eléctrodos de aço inox e dois eléctrodos de aço macio, que permite a medição do potencial de corrosão e da resistência de polarização das armaduras.

Os resultados obtidos ao longo deste trabalho mostram que a monitorização de estruturas é uma ferramenta válida para integrar os sistemas de gestão da manutenção, permitindo identificar processos de degradação do betão armado e detetar o início da corrosão das armaduras. Com a utilização de dois sistemas de monitorização foi possível observar o processo de degradação do betão armado que, numa primeira fase, envolve alterações ao nível da resistividade iónica do betão e, numa segunda fase, conduz à queda do potencial de corrosão e da resistência de polarização linear das armaduras sinalizando o início do processo de corrosão destas.

Ao longo dos ensaios foi possível detetar diferenças de comportamento entre os vários tipos de armaduras utilizados, tendo-se verificado que as armaduras galvanizadas apresentaram um melhor comportamento face à ação dos cloretos que as armaduras correntes ou as revestidas.

Palavras chave

Monitorização, gestão da manutenção, degradação do betão, corrosão das armaduras, durabilidade.

Abstract

The reinforced concrete constructions, regardless of all the technological developments reached, have a limited durability in time due to their interaction with the surrounding environment. Structural projects tend to define the horizon of 50 years for their service life and, in exceptional cases due to the cost or relevance of the work, 100 years of service life. Although there is a legal framework that defines the criteria to be adopted to achieve these levels of durability, there are many examples of early aging of buildings and infrastructures, which translates into high economic and social costs resulting from the need to carry out repair work not foreseen or by reducing the levels of service available. One way to mitigate the effects of aging structures can be to implement maintenance management systems that allow problems to be detected and repaired through early detection to extend their life. The digitization of the construction sector, namely by introducing the BIM methodology to manage the entire construction process, can be the key to anchoring new models and maintenance management systems. In this scenario the monitoring of the degradation of the structures with sensors will allow to collect information integrable in maintenance tools interconnected to 3D models and the database of the buildings.

The focus of this thesis is the analysis and treatment of information on the degradation state of reinforced concrete structures, obtained with the aid of electrochemical monitoring systems that use probes embedded in the concrete, for later integration in tools of maintenance management, with the objective of identifying processes that indicate the possibility of the development of phenomena of degradation of the concrete or of corrosion of the reinforcement inserted therein. The electrochemical systems allow to evaluate changes in the ionic conductivity of the concrete resulting from its chemical contamination and the corrosion phenomena of the reinforcement, occurring in the advanced stages of the degradation process.

The methodology adopted involved laboratory tests and the monitoring of an equipment in operation in a WWTP. In the laboratory, two sets of tests were carried out with reinforced concrete test pieces. The first group of specimens was subjected to the action of chlorides and the second group were exposed to attack by sodium and magnesium sulfates. At the WWTP the performance of the ionic resistivity monitoring system of the concrete subjected to urban waste water was tested in three zones with different exposures. In the laboratory specimens, four different concrete reinforcement solutions were used, unprotected reinforcement and painted with acrylic paint and protected reinforcement by galvanization and through impressed current.

All probes were monitored with two electrochemical monitoring systems. The first system uses probes that measure the ionic resistivity of the concrete and consists of a pair of equal

electrodes, 30 mm in diameter and 50 mm high. These electrodes were placed with a 50 mm spacing. The other system consists of a single block that integrates the connection to the specimen armature, two reference electrodes (graphite), two stainless steel electrodes and two mild steel electrodes, which allows the measurement of the corrosion potential and the resistance of polarization of the reinforcement.

The results obtained during this work show that the structure monitoring is a valid tool to integrate the maintenance management systems, allowing to identify concrete degradation processes and to detect the beginning of the corrosion of the reinforcement. With the use of two monitoring systems, it was possible to observe the degradation process of the reinforced concrete, which in the first phase involves changes in the ionic resistivity of the concrete and, in a second phase, leads to a fall in corrosion potential and linear polarization of the armatures signaling the beginning of the process of corrosion of these.

Throughout the tests it was possible to detect differences in behavior between the various types of reinforcement used, and it was verified that the galvanized reinforcements showed a better behavior against the action of the chlorides than the current or coated reinforcements.

Keywords

Monitoring, maintenance management, concrete degradation, corrosion of reinforcement, durability.

Índice

Dedicatória	iii
Agradecimentos.....	v
Resumo.....	vii
Abstract.....	ix
Lista de Figuras	xv
Lista de Tabelas	xxi
Lista de Acrónimos	xxiii
Capítulo I	1
Introdução	1
1.1. Enquadramento da tese.....	1
1.2. Descrição do problema e objetivos da investigação	2
1.3. Argumento da tese.....	4
1.4. Principais contributos	5
1.5. Organização da tese	5
Capítulo II	9
Durabilidade das estruturas de betão armado	9
2.1. Introdução	9
2.2. Impacto ambiental da utilização de betão armado	13
2.3. Tipologias de degradação.....	19
2.4. Principais fatores da degradação do betão armado.....	21
2.4.1. Permeabilidade e Porosidade	21
2.4.2. Carbonatação	26
2.4.3. Ação dos cloretos	29
2.4.4. Ataque por sulfatos	33
2.4.5. Reações expansivas internas	36
2.4.6. Corrosão das armaduras	37
2.5. Tempo de vida útil de uma estrutura	39
2.5.1. Conceção e dimensionamento	41
2.5.2. Materiais	42
2.5.3. Execução.....	42
2.5.4. Cura do betão	43
2.5.5. Vida útil das estruturas de betão armado.....	43

Capítulo III	49
Sistemas de monitorização da degradação para uma abordagem de manutenção BIM	49
Resumo	49
3.1. Introdução	50
3.2. Modelação Informática de Edifícios (BIM - Building Information Modeling)	51
3.3. Ferramentas de gestão e manutenção.....	53
3.4. Técnicas de monitorização.....	56
3.4.1. Técnicas eletroquímicas	56
3.4.1.1. Medição do potencial eletroquímico	56
3.4.1.2. Medição da resistividade iónica do betão	57
3.4.1.3. Resistência de polarização linear	58
3.4.1.4. Pulso galvânico.....	60
3.4.1.5. Espectroscopia de impedância eletroquímica (EIS)	60
3.4.1.6. Ruído eletroquímico.....	61
3.4.1.7. Eléctrodo de Ag/AgCl produzido por imersão em ácido hipoclorito de sódio	62
3.4.2. Métodos de ondas elásticas.....	62
3.4.2.1. Ensaio de velocidade de pulso ultrassónico	62
3.4.2.2. Tomografia de pulso (ultrassónico)	63
3.4.3. Detecção ótica.....	64
3.4.3.1. Redes/Grade de Bragg de fibra ótica	64
3.4.4. Termografia por infravermelhos	65
3.4.5. Sistemas de identificação por radio frequência	67
3.4.6. Análise das técnicas de monitorização.....	68
3.5. Conclusões.....	69
Capítulo IV	71
Monitorização eletroquímica da degradação de estruturas de betão	71
Resumo	71
4.1. Degradação de estruturas de betão armado.....	72
4.2. A monitorização permanente do fenómeno degradativo	72
4.3. Técnicas de análise	75
4.3.1. Medição do Potencial de corrosão	76
4.3.2. Velocidade de corrosão	77
4.3.3. Resistência de Polarização Linear	78

4.3.4. Espectroscopia de Impedância Eletroquímica	79
4.3.5. Ruído eletroquímico.....	80
4.3.6. Resistência elétrica	81
4.3.7. Macro célula galvânica.....	81
4.4. Variáveis ambientais	82
4.4.1. Condutividade iônica do betão	82
4.4.2. Determinação de espécies químicas	83
4.5. Conclusões	83
Capítulo V	85
Parte experimental.....	85
5.1. Materiais	86
5.1.1. Armaduras	86
5.1.2. Betão	87
5.1.3. Execução dos provetes.....	87
5.1.4. Exposição ambiental	88
5.1.4.1. Contaminação com cloretos e sulfatos.....	88
5.1.4.2. Contaminação com águas residuais	89
5.2. Ensaios.....	90
5.2.1. Fluorescência de raios X (XRF).....	90
5.2.2. Determinação de cloretos livres e fixos	90
5.2.3. Ensaio de resistência à compressão	91
5.2.4. Carbonatação	92
5.3. Sistema de monitorização	92
5.3.1. Determinação da velocidade de corrosão - sistema Monicorr	93
5.3.2. Determinação da resistividade iônica do betão - sistema Conducicorr	95
5.4. Resumo da parte experimental	96
Capítulo VI.....	99
Monitorização da degradação de estruturas de betão armado em ambientes contendo iões cloreto	99
Resumo.....	99
6.1. Introdução	100
6.2. Fase Experimental	102
6.3. Resultados e discussão	104

6.3.1. Processo de corrosão das armaduras	104
6.3.2. Penetração dos cloretos.....	108
6.4. Conclusões.....	110
Capítulo VII.....	111
Influência da aplicação de revestimentos à armadura no comportamento de betão armado em ambientes salinos	111
Resumo	111
7.1. Introdução	112
7.2. Fase Experimental.....	114
7.3. Resultados e discussão.....	115
(a) Processo de corrosão da armadura	115
(b) Efeitos da aplicação do revestimento orgânico.....	117
(c) Efeitos da proteção catódica	118
7.4. Conclusões.....	120
Capítulo VIII.....	121
Avaliação de sistemas online de monitorização da degradação de estruturas de betão em ETAR's, sujeitas a ambientes de sulfatos, para inclusão em BIM-Manutenção	121
Resumo	121
8.1. Introdução	122
8.2. Parte Experimental.....	124
a) Sistema de monitorização	124
b) Ensaios laboratoriais.....	126
c) Ensaios na estação de tratamento de águas residuais (ETAR)	127
8.3. Resultados e discussão.....	128
a) Provetes em laboratório	128
b) Estação de tratamento de águas residuais	133
8.4. Conclusões.....	135
Capítulo IX	137
Conclusões e trabalho futuro.....	137
9.1. Principais conclusões.....	137
9.2. Direções para trabalhos futuros	140
Bibliografia.....	141
Anexos	155

Lista de Figuras

Figura 1 - Viga armada segundo o sistema Hennebique [30].	10
Figura 2 - Processo de transformação do calcário e da argila em clínquer em função do aumento da temperatura, adaptado de [42].	13
Figura 3 - Principais produtores mundiais de cimento nos anos 2012 a 2017 (MTon), adaptado de [43].	14
Figura 4 - Consumo de cimento entre 2006 e 2015 em Portugal, Espanha e na EU (Fonte: ERMCO).	15
Figura 5 - Emissões de CO ₂ em kg/tonelada de cimento produzido entre 1990 e 2014, adaptado de [45].	15
Figura 6 - Classificação de inibidores de corrosão, adaptado de [52].	17
Figura 7 - Impregnação hidrofóbica (esq.), impregnação (centro) e revestimento por pintura (dir.) [53].	17
Figura 8 - Causas da deterioração do betão - modelo de interação, adaptado de [61], adaptado de [60]	21
Figura 9 - Principais fatores envolvidos nos processos de transporte no betão, essenciais para os fenómenos de corrosão, adaptado de [63].	22
Figura 10 - Influência da razão A/C na permeabilidade, adaptado de [62].	23
Figura 11 - Velocidade das reações em função da temperatura, adaptado de [62].	24
Figura 12 - Distribuição dos poros em função da dimensão segundo Setzer, adaptado de [70].	24
Figura 13 - Esquema do processo de carbonatação do betão adaptado por [75], com base em [2].	27
Figura 14 - Variação da concentração Ca(OH) ₂ /CaCO ₃ e do pH em função da profundidade [75].	27
Figura 15 - Fluxo de cloretos (F) em função do seu gradiente de concentração C(x,t), adaptado de [73].	30
Figura 16 - Aumento do fluxo de cloretos em função do aumento da sua concentração, adaptado de [73].	31
Figura 17 - Função erro erf (x).	32
Figura 18 - Esquema do fluxo de eletrões e de iões durante o processo de corrosão da armadura.	38

Figura 19 - Volume relativo dos produtos da corrosão [75].	38
Figura 20 - Diagrama de Pourbaix simplificado.	39
Figura 21 - Relação entre os fatores que determinam a durabilidade e o desempenho do betão, adaptado de [62].	40
Figura 22 - Modelo de Tuutti para a degradação do betão armado, adaptado de [2].	44
Figura 23 - Relação entre desempenho e vida útil de uma estrutura de betão armado, adaptado de [62].	47
Figura 24 - Esquema das diferentes fases da revolução Industria.	50
Figura 25 - Sensor constituído por um ânodo em aço preto e um cátodo em metal nobre.	55
Figura 26 - Measurement of electrochemical potential.	57
Figura 27 - Técnica dos quatro eléctrodos.	58
Figura 28 - Sistema MoniCorr para medição da resistência de polarização linear.	59
Figura 29 - Sensor galvânico composto por aço corrente e aço inox [144].	60
Figura 30 - Circuito equivalente para o sistema aço betão e representação no diagrama de Nyquist.	61
Figura 31 - Eléctrodo de Ag/AgCl embebido no centro de um provete [147].	62
Figura 32 - Tomograma obtido no transdutor a 250 kHz.	64
Figura 33 - Princípio de funcionamento de um sensor FBG, adaptado de [155].	64
Figura 34 - Efeitos de uma anomalia interior no fluxo de calor superficial.	66
Figura 35 - Representação esquemática do sistema apresentado na patente chinesa CN202533356U que tem conjuntos de sondas que permite determinar o potencial eletroquímico do ferro, a velocidade de corrosão, a condutividade do betão, o pH e a concentração de iões cloreto [172].	75
Figura 36 - Representação esquemática do sistema apresentado na patente americana US2011/0259092A1 que tem conjuntos de sondas que permite determinar a velocidade de corrosão, a condutividade do betão, o pH e a concentração de iões cloreto [176].	75
Figura 37 - Representação esquemática do sistema apresentado na patente chinesa CN101256135A para determinação da velocidade de corrosão pela técnica do par galvânico [188].	76
Figura 38 - Representação esquemática do sistema apresentado na patente chinesa CN202533356U para determinação da velocidade de corrosão pela técnica da resistência elétrica [184].	77

Figura 39 - Representação esquemática do sistema apresentado na patente eslovaca SI22559(A) para determinação da velocidade de corrosão pela técnica da resistência elétrica [193].	78
Figura 40 - Representação esquemática do sistema apresentado na patente portuguesa PT2011/104554 para determinação da condutividade iônica do betão [194].	78
Figura 41 - Circuito equivalente para o sistema aço betão e representação no diagrama de Nyquist.	80
Figura 42 - Molde com armadura com proteção catódica (esquerda) e galvanizada (direita). .	86
Figura 43 - Molde com armadura pintada (esquerda) e sem proteção (direita).	86
Figura 44 - Fontes de alimentação utilizadas para imposição da corrente catódica nos ensaios com cloretos (esquerda) e nos ensaios com sulfatos (direita).	87
Figura 45 - Provete cúbicos com 150 mm de aresta, produzidos em moldes plásticos e metálicos, após a betonagem, durante a desmoldagem e a serem imersos em água.	88
Figura 46 - Preparação da solução de sulfato de sódio e magnésio.	88
Figura 47 - Recipientes fixados sobre os provetes de betão para permitir a sua contaminação com cloretos (à esquerda) e sulfatos (à direita).	89
Figura 48 - Localização dos sensores na ETAR de Portalegre.	89
Figura 49 - XRF (Florescência de raio X).	90
Figura 50 - Pó de betão extraído do provete R1 (esquerda) e provetes 10 e 12 (direita).	90
Figura 51 - Pó de betão extraído do provete R1.	91
Figura 52 - Prensa para ensaios de compressão.	91
Figura 53 - Caroteadora e a determinação da frente de carbonação nos provetes de betão extraídos.	92
Figura 54 - Curva de polarização obtida pelo sistema Monlcorr.	94
Figura 55 - Sensor do sistema Monicorr e sua instalação nos provetes de betão.	94
Figura 56 - Sistema de medição e aquisição de dados - Monicorr.	95
Figura 57 - Sensor do sistema Conduticorr e sua instalação nos provetes de betão.	95
Figura 58 - Sistema de medição e aquisição de dados - Conduticorr.	96
Figura 59 - Esquema representativo do sistema de monitorização Monlcorr ^{Pat.} , usado nos ensaios.	103
Figura 60 - Vista do posicionamento dos sistemas de monitorização Monlcorr e Condutlcorr antes da betonagem e após os 700 dias de ensaio.	104

Figura 61 - Variação da Resistência de Polarização, R_p , e do Potencial de Corrosão da armadura do provete S1 durante a imersão em solução salina.	105
Figura 62 - Variação da Resistência de Polarização, R_p , e do Potencial de Corrosão da armadura do provete S2 durante a imersão em solução salina.	105
Figura 63 - Variação da Resistência de Polarização, R_p , e do Potencial de Corrosão da armadura do provete S3 durante a imersão em solução salina.	106
Figura 64 - Variação do Potencial da armadura inserida no provete S1 a diferentes profundidades, durante a imersão em solução salina.	106
Figura 65 - Esquema do Diagrama de Evans representado o processo de corrosão na fase de iniciação (a) e durante a fase de propagação (b).	107
Figura 66 - Relação entre os valores da Resistência de Polarização Linear, R_p , e o Potencial de Corrosão da armadura do provete S1, medidos na fase final dos ensaios.	108
Figura 67 - Variação, ao longo do tempo, da resistividade do betão e do teor de cloretos ao nível da armadura instalada no provete S1.	109
Figura 68 - Variação temporal da resistividade do betão e da resistência à polarização linear, R_p , do aço da armadura inserida no provete S1.	110
Figura 69 - Modelo de Tuutti para a degradação do betão armado, adaptado de [2].	113
Figura 70 - Diagrama de Pourbaix para o zinco, adaptado de [10].	114
Figura 71 - Variação da Resistência de Polarização, R_p , e Potencial de Corrosão da armadura sem tratamento superficial durante a imersão em solução salina.	116
Figura 72 - Comportamento da resistividade do betão e da concentração de cloretos ao nível das armaduras instaladas no provete S1.	116
Figura 73 - Variação da Resistência de Polarização, R_p , e do Potencial de Corrosão da armadura pintada durante a imersão em solução salina.	117
Figura 74 - Variação da Resistência de Polarização, R_p , e do Potencial de Corrosão da armadura galvanizada durante a imersão em solução salina.	119
Figura 75 - Variação da Resistência de Polarização, R_p , e do Potencial de Corrosão da armadura protegida catodicamente durante a imersão em solução salina.	119
Figura 76 - Aço no fim dos ensaios: armadura sem proteção, armadura pintada, aço galvanizado e armadura protegida catodicamente.	120
Figura 77 - Provete de betão testado em laboratório.	126
Figura 78 - Planta da ETAR de Portalegre.	127
Figura 79 - Locais onde estão localizados os sensores.	128

Figura 80 - Variação da concentração de sulfatos por profundidade ao longo do tempo.	129
Figura 81 - Camada superficial do provete 10 após o ensaio, antes e depois da remoção do betão solto.	129
Figura 82 - Camada de hidróxido de magnésio (esquerda) e eflorescência de sais (direita).	130
Figura 83 - Variação da resistividade de betão, ao longo do ensaio em dias, a 10 e a 30 mm de profundidade.	130
Figura 84 - Variação do potencial de corrosão e da resistência de polarização das armaduras galvanizadas, revestidas e sem proteção ao longo do tempo de ensaio.	131
Figura 85 - Variação da resistência de polarização das armaduras protegidas catodicamente, galvanizadas, revestidas e sem proteção ao longo do ensaio.	132
Figura 86 - Variação do potencial de corrosão das armaduras protegidas catodicamente, galvanizadas, revestidas e sem proteção ao longo do ensaio.	132
Figura 87 - Variação do potencial de corrosão nas diferentes camadas para as armaduras galvanizadas e sem proteção em função do tempo.	133
Figura 88 - Armaduras galvanizadas e revestidas removidas no fim dos ensaios.	133
Figura 89 - Resistividade a 1 e 3 cm de profundidade - Poço de recirculação de lamas.	134
Figura 90 - Resistividade a 1 e 3 cm de profundidade - Caixa de recirculação de lamas.	134
Figura 91 - Resistividade a 1 e 3 cm de profundidade - Decantador secundário.	134
Figura 92 - Carotes extraídos do poço de recirculação de lamas.	135

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Camada de recobrimento das armaduras segundo as diferentes legislações nacionais.....	12
Tabela 2- Camada de recobrimento das armaduras segundo a NP EN 1992 [36].	13
Tabela 3 - Sistemas de tratamento superficial utilizados no estudo de Medeiros e al. [54]. ...	18
Tabela 4 - Principais fenómenos de degradação das estruturas de betão armado.	20
Tabela 5 - Valores indicativos do tempo de vida útil de projeto [105].	40
Tabela 6 - Modelos para comprovar a durabilidade, adaptado de [110].....	45
Tabela 7 - Limites da composição e da classe de resistência do betão em função das classes de exposição para uma vida útil de 50 anos, adaptado de [39].	46
Tabela 8 - Potencial de corrosão [137].	57
Tabela 9 - Resistividade iónica do betão [139].	58
Tabela 10 - Velocidade de corrosão [5].	59
Tabela 11 - Classificação da qualidade do betão com	63
Tabela 12 - Técnicas de monitorização.	68
Tabela 13 - Características das patentes estudadas.....	74
Tabela 14 - Composição dos betões utilizados.	87
Tabela 15 - Especificação do betão fornecida pelo produtor.	87
Tabela 16 - Parametros de Tafel em função do estado do processo corrosivo.	94
Tabela 17 - Resumo das atividades desenvolvidas.	97
Tabela 18 - Resistividade - risco de corrosão [11].	124
Tabela 19 - Potencial - rico de corrosão [137].	125
Tabela 20 - Risco de corrosão em função da intensidade de corrente de corrosão [5].....	126
Tabela 21 - Teor em sulfatos de três zonas da ETAR.....	135

Lista de Acrónimos

AE	Acoustic Emission
AEC	Arquitetura, Engenharia e Construção
ASTM	American Society for Testing and Materials
BER	Bar Electrical Resistance
BIM	Building Information Modelling
CFRP	Polímeros Reforçados com Fibras de Carbono
CPS	Cyber Physical Systems
C-S-H	Calcium silicate hydrate
EIS	Electrochemical Impedance Spectroscopy
EM	Electromagnetic Methods
EMPIC	Instituto dos Mercados Públicos, do Imobiliário e da Construção, I.P.
EN	Electrochemical Noise
ERMCO	European Ready Mixed Concrete Organization
ETAR	Estação de Tratamento de Águas Residuais
ESA	External Sulfate Attack
FA	Fly Ash
FBG	Fiber Bragg Grating
FRP	Polímeros Reforçados com Fibras
GFRP	Polímeros Reforçados com Fibras de vidro
GGBS	Ground Granulated Blast-furnace Slag
GPM	Galvanostatic Pulse Method
GPR	Ground Penetrating Radar
ICCP	Impressed Current Cathodic Protection
IRT	Infrared Thermograph
ISA	Internal Sulfate Attack
LEIS	Localised Electrochemical Impedance Spectroscopy
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil

LPR	Linear Polarization Resistance
OCP	Open Circuit Potential
RAA	Reações Álcalis-Agregado
RAS	Reações Álcalis-Sílica
RCD	Resíduos da Construção e Demolição
RSI	Reações Sulfáticas Internas
SCE	Saturated Calomel Electrode
SCM	Supplementary Cementitious Materials
UPE	Ultrasonic Pulse Echo
UPV	Ultrasonic Pulse Velocity
XRF	Fluorescência de Raios X
WBCSD	World Business Council for Sustainable Development

Capítulo I

Introdução

Neste capítulo apresenta-se o resumo do trabalho de investigação relativa à tese de doutoramento sob a designação "*Monitorização da degradação de estruturas de betão armado com recurso a sondas eletroquímicas*". No primeiro tópico efetua-se o enquadramento da tese, seguido da descrição do problema e dos objetivos da investigação. Em sequência é apresentado o argumento da tese, bem como as principais contribuições resultantes do trabalho efetuado. No fim, apresenta-se a forma como a tese está organizada.

1.1. Enquadramento da tese

A durabilidade de uma estrutura de betão armado é o reflexo da sua aptidão para responder aos requisitos de utilização, resistência e estabilidade ao longo da sua vida útil, cuja dilatação no tempo depende, entre outros fatores, do tipo e periodicidade da manutenção a que foi sujeita. A degradação do betão armado, resultado da interação com o meio envolvente, e as consequências para a sua durabilidade tem sido um tema recorrente na literatura relativa à Engenharia Civil desde meados dos anos 70, devido ao impacto socioeconómico dos fenómenos de degradação das estruturas [1], [2], [3].

Para incrementar a durabilidade de uma estrutura pode recorrer-se a betões mais resistentes aos fenómenos de degradação, à utilização de sistemas de proteção das armaduras contra a corrosão ou à implementação de sistemas de manutenção preditiva. No contexto da manutenção surgiu o interesse pela monitorização de estruturas de betão como forma de identificar precocemente sinais de degradação, associados ao ingresso de agentes exteriores, tais como os cloretos, os sulfatos e o dióxido carbono, ou a deteção de fenómenos de corrosão das armaduras [4], [5], [6].

Apesar do trabalho entretanto desenvolvido na procura de indicadores que permitam quantificar os fenómenos de degradação do betão [7], [8], [9], a monitorização de estruturas de betão armado continua a ser de aplicação bastante restrita, sendo poucas as estruturas monitorizadas, provavelmente devido ao facto dos resultados da degradação do betão só serem sensíveis a longo prazo, o que reduz significativamente o impacto da implementação deste tipo de sistemas. Existem também outros fatores que podem ter algum impacto na utilização generalizada de sistemas de monitorização, nomeadamente a complexidade da instalação deste tipo de sistemas e a existência de alguma variabilidade nos resultados obtidos, sendo necessário uma cuidada interpretação destes [10], [11], [12].

A monitorização do betão pode ser efetuada através da recolha pontual, como por exemplo com o recurso a inspeções regulares, ou pela obtenção contínua de informação, através de medições ao longo do tempo pela utilização de sistemas de funcionamento permanente instalados na estrutura. Os principais sistemas de monitorização recorrem a sensores de medição de grandezas físicas (temperatura e deformações) ou eletroquímicas (resistividade, resistência de polarização, intensidade de corrente de corrosão, etc.) [13], [14]. Mais recentemente, têm surgido técnicas como a deteção ótica (deformações e temperatura) [15] ou a termografia (temperatura superficial) [16].

Neste trabalho foram utilizados sensores eletroquímicos embebidos no betão para se efetuar a monitorização contínua, devido à simplicidade dos sistemas e à afinidade existente entre as medições efetuadas por estes sensores e os fenómenos de degradação a que o betão e as armaduras estão sujeitos. Os sensores utilizados são dispositivos que permitem obter informação sobre o comportamento eletroquímico do betão, designadamente sobre a sua condutividade iónica que está relacionada ao nível de contaminação iónica do betão, e do aço nele inserido, nomeadamente através da determinação do potencial de corrosão das armaduras (E_{corr}) e da resistência de polarização (R_p) destas.

A eficácia dos sistemas de monitorização de estruturas de betão armado depende da sistematização da recolha e tratamento de dados, sendo a sua integração nos sistemas de manutenção a forma mais eficaz de potenciar o seu uso. Assim, será possível proceder ao tratamento dos dados obtidos de forma integrada, contribuindo para o desenvolvimento de processos de manutenção preditiva. Por outro lado, tem-se assistido na última década a um processo acelerado de desenvolvimento e implementação de sistemas de automação e de digitalização da economia que, no setor da construção, esta a ser corporizada através do desenvolvimento de uma metodologia de trabalho mais interativa designada por BIM (Building Information Modeling) baseada em modelos 3D [17].

A metodologia BIM pode ser definida como um processo que envolve gerar, armazenar, gerir, trocar e partilhar informações relativas a um determinado projeto de construção de modo interoperável e com possibilidade de reutilização [18]. Após o projeto estar concluído a informação fica disponível para a fase de gestão da infraestrutura em termos de manutenção e utilização, com base em ferramentas digitais de operação e manutenção [19], [20]. Tais ferramentas requerem informação regular ao longo do tempo sobre o estado de degradação da estrutura, ou seja, uma monitorização da mesma com base em sensores incorporados na estrutura.

1.2. Descrição do problema e objetivos da investigação

O problema estudado nesta tese é a monitorização da degradação das estruturas de betão armado e a sua utilização como suporte para os sistemas de gestão da manutenção. A

degradação do betão resulta da sua exposição ambiental, designadamente devido à ação de cloretos, sulfatos, dióxido de carbono e águas residuais. A ação destes agentes tem frequentemente graves consequências económicas para os donos de obra, mas também cria problemas ambientais, que afetam toda a sociedade, seja pela produção de resíduos de construção e demolição (RCD), seja pela intensidade carbónica que está associada à produção do cimento incorporado no betão. Entre os diversos caminhos que se podem percorrer para fazer face à degradação do betão, encontra-se a deteção precoce dos fenómenos de degradação, objetivo este que pode ser alcançado através de inspeções frequentes ou da monitorização contínua das estruturas. Neste sentido, a utilização de sondas eletroquímicas permite monitorizar parâmetros característicos do betão armado, através das quais é possível acompanhar a evolução dos processos de degradação que conduzirá, numa fase mais avançada, à corrosão do aço nele inserido, originando consequentemente um incremento da degradação do betão devido ao aumento de volume dos produtos da corrosão.

Nesta perspetiva, a obtenção de informação sobre o surgimento e desenvolvimento de fenómenos de degradação do betão, permite estimar a evolução deste processo e definir atempadamente uma estratégia de intervenção. Com esta abordagem procura-se demonstrar a utilidade do recurso a sistemas de monitorização do betão armado para melhorar a eficácia dos processos de manutenção de estruturas de edifícios e de infraestruturas. Para este efeito foram testados provetes de betão, com sondas embebidas, expostos à ação de cloreto de sódio e de sulfatos de sódio e magnésio. Em paralelo foi monitorizada a estação de tratamento de águas residuais (ETAR) de Portalegre através da instalação de sondas em fase de operação.

Ao longo deste trabalho comparam-se os resultados da monitorização em laboratório de estruturas de betão armado em ambientes agressivos, cloretos e sulfatos, através da medição de parâmetros eletroquímicos, designadamente a resistividade iónica do betão, o potencial de corrosão e a resistência de polarização das armaduras. Os resultados da monitorização, designadamente da resistividade do betão, potencial de corrosão e resistência de polarização, são cruzados com a profundidade de penetração dos cloretos e dos sulfatos e respetiva concentração, de forma a estabelecer relações causa-efeito.

O objetivo principal deste trabalho é contribuir para validar o interesse do desenvolvimento de sistemas de gestão da manutenção que incorporem a monitorização de estruturas de betão armado, através do recurso a sondas eletroquímicas, por permitirem detetar precocemente problemas associados à degradação do betão conduzindo a intervenções de manutenção em fases iniciais do processo de degradação. Mostrar que a recolha sistemática de informação relativa ao comportamento eletroquímico do betão permite obter uma visão global do estado de degradação da estrutura, através da identificação das zonas mais sensíveis, logo com maiores necessidades de acompanhamento e, eventualmente, de intervenção.

Pretende-se também mostrar que é possível detetar o momento a partir do qual estão criadas as condições para se iniciar o processo de corrosão das armaduras inseridas no betão e estabelecer uma correlação entre este fenómeno e o desenvolvimento do estado de degradação do betão.

Tendo como referência o objetivo principal pretende-se atingir os seguintes objetivos específicos:

- Relacionar entre si os resultados da resistividade iónica do betão e resistência de polarização das armaduras;
- Comparar os resultados da monitorização com base na profundidade e concentração de cloretos e a existência de corrosão nas armaduras;
- Avaliar os efeitos da ação dos sulfatos através da comparação entre a sua concentração a diferentes profundidades e os resultados da monitorização eletroquímica;
- Identificar semelhanças e diferenças entre os resultados da monitorização da degradação do betão por ação dos cloretos e dos sulfatos;
- Comparar o impacto da penetração dos cloretos e do ataque por sulfatos em diferentes soluções de armaduras, designadamente armadura corrente, pintada com tinta acrílica e protegida catodicamente por galvanização e por corrente impressa;
- Avaliar o interesse da informação recolhida para posterior utilização na tomada de decisão relativa a trabalhos de manutenção;
- Avaliar o interesse da integração da informação recolhida na monitorização de estruturas de betão armado em modelos BIM.

1.3. Argumento da tese

Nesta tese propõe-se a interligação entre os sistemas de recolha de dados da monitorização do betão armado e as ferramentas de manutenção suportadas pela metodologia BIM. O argumento desta tese é:

A vida útil das estruturas de betão armado pode ser incrementada através da monitorização eletroquímica do betão, desde que os resultados obtidos possam ser integrados num sistema de gestão da manutenção que efetue o tratamento adequado dos dados e promova a elaboração de planos de ação conducentes à correção dos problemas detetados. Deste modo, a deteção precoce de fenómenos de degradação terá como resposta uma ação tendente a mitigar as suas consequências em termos de degradação do betão.

Este argumento sustenta-se nas seguintes premissas:

- A eficácia das atividades de manutenção depende da existência de um enquadramento adequado, designadamente de um plano de manutenção;
- A metodologia BIM permite agilizar a recolha, o tratamento e a disponibilização de informação;

- Os sistemas de monitorização apresentados, com recurso a sensores inseridos no betão, permitem a deteção precoce de fenómenos de degradação do betão e de corrosão das armaduras;
- A utilização de sistemas de gestão da manutenção promove a definição de ações tendentes a corrigir os problemas detetados e a sua execução;
- A adequada manutenção das estruturas de betão armado permite prolongar a sua vida útil para além dos limites inicialmente estabelecidos.

1.4. Principais contributos

As principais contribuições da presente tese são as seguintes:

A primeira contribuição é a identificação dos principais sistemas de monitorização do betão armado numa perspetiva de utilização da metodologia BIM, apresentado no capítulo III.

A segunda contribuição é uma análise comparativa entre patentes de sistemas de monitorização eletroquímicas, que se apresenta em detalhe no capítulo IV.

A terceira contribuição são os resultados da monitorização de provetes de betão armado expostos a ambiente salino, com recurso a dois sistemas de monitorização eletroquímica, que medem a resistividade iónica do betão, o potencial de corrosão e a resistência de polarização. Estes resultados são apresentados no capítulo VI.

A quarta contribuição resulta da comparação das consequências da degradação do betão em ambiente salino para armaduras correntes, pintadas com tinta acrílica e protegidas catodicamente, por galvanização e por corrente imposta. No capítulo VII são apresentados os resultados obtidos.

A quinta contribuição diz respeito à análise comparativa entre os resultados da monitorização de provetes de betão expostos ao ataque por sulfatos em laboratório e os resultados da monitorização de três zonas de uma ETAR. Num caso o betão está permanentemente submerso, noutro está sujeito a ciclos molhagem/secagem e no terceiro exposto a um ambiente húmido resultante da presença de águas residuais. No capítulo VIII são detalhados os resultados destes ensaios.

1.5. Organização da tese

A tese está organizada ao longo de nove capítulos que resultam do trabalho de investigação desenvolvido para alcançar os objetivos traçados.

O Capítulo I - *Introdução* - enquadra o objeto da tese, define os objetivos e respectivos argumentos e contributos, terminando com a apresentação da sua organização.

O Capítulo II - *Durabilidade de estruturas de betão armado* - na primeira parte efetua-se um enquadramento histórico sobre a origem do betão armado, identificando os principais marcos normativos, analisa-se a sustentabilidade e a intensidade de utilização do cimento e identificam-se as principais abordagens suscetíveis de mitigar os impactos ambientais associados ao seu uso. Na segunda parte deste capítulo apresentam-se os fenómenos que influenciam a durabilidade das estruturas de betão armado, desenvolvendo com maior profundidade os principais fatores da degradação. O capítulo termina com uma abordagem sobre a problemática da durabilidade e da vida útil das estruturas de betão armado tendo em conta o enquadramento legal atual.

O Capítulo III - *Sistemas de Monitorização da degradação para uma abordagem de manutenção BIM* - efetua-se um enquadramento sobre a temática da digitalização e da automação focado no seu impacto potencial para o setor da construção, nomeadamente no que se refere à utilização da metodologia BIM na ótica da manutenção de estruturas. São identificados sistemas e técnicas de monitorização suscetíveis de serem utilizados, num enquadramento BIM, como ferramentas de suporte a sistemas de manutenção.

O Capítulo IV - *Monitorização eletroquímica da degradação de estruturas de betão* - apresenta alguns dos principais sistemas de monitorização eletroquímica do betão armado, classificando-os em função das técnicas de deteção utilizadas divididas em três tipos a medição do potencial de corrosão, a medição da velocidade de corrosão e a medição das variáveis ambientais.

O Capítulo V - *Materiais, ensaios e monitorização* - apresenta os materiais utilizados, descreve os procedimentos de ensaios adotados e os sistemas de monitorização utilizados nas estruturas de betão armado investigadas.

O Capítulo VI - *Monitorização da degradação de estruturas de betão em ambientes contendo iões cloreto* - mostra os resultados da monitorização eletroquímica, efetuada em laboratório, de provetes de betão armado expostos à ação dos cloretos com recurso a sondas de medição da resistividade iónica do betão, resistência de polarização e potencial de corrosão das armaduras. Paralelamente, são apresentados os resultados das medições do teor de cloretos do betão efetuadas a diferentes profundidades.

O Capítulo VII - *Influência da aplicação de revestimentos à armadura no comportamento de betão armado em ambientes salinos* - compara os resultados da monitorização eletroquímica de três soluções de armaduras embebidas em provetes de betão contaminados com cloretos. Foi comparado o comportamento das armaduras correntes com armaduras revestidas por tinta acrílica, armaduras galvanizadas e armaduras protegidas catodicamente. Foram medidas a

resistividade iônica do betão, a resistência de polarização e o potencial de corrosão das armaduras e a concentração de cloretos no betão a diferentes profundidades.

O Capítulo VIII - *Avaliação de sistemas online de monitorização da degradação de estruturas de betão em ETAR's, sujeitas a ambientes de sulfatos, para inclusão em BIM-Manutenção* - apresenta os resultados da monitorização em laboratório de provetes de betão armado expostos ao ataque por sulfatos e em ambiente real, na ETAR de Portalegre, de estruturas de betão armado expostas à ação de águas residuais em diferentes condições. Em laboratório foram efetuadas as medições da resistividade do betão, resistência de polarização e potencial de corrosão das armaduras em provetes com armaduras correntes, revestidas com tinta acrílica, galvanizadas e protegidas catodicamente e determinado o teor de sulfatos em profundidade. Na ETAR foi monitorizada a resistência iônica do betão com recurso a sondas instaladas durante a fase de operação da infraestrutura.

O Capítulo IX - *Conclusões e trabalho futuro* - resume as principais conclusões que resultaram do trabalho desenvolvido e traça o caminho para os trabalhos a desenvolver no futuro.

Capítulo II

Durabilidade das estruturas de betão armado

2.1. Introdução

A construção é um setor de atividade central no desenvolvimento das sociedades humanas. Desde os tempos mais remotos, a construção está ligada aos principais progressos sociais alcançados pelo homem, nomeadamente no erigir de abrigos, edifícios, palácios ou arranha céus, passando pela execução de infraestruturas de transporte, saneamento básico, produção de energia e telecomunicações.

Hoje, como no passado, não podemos olhar para o futuro sem envolver o setor da construção como um dos principais vetores da mudança. O grande desafio que se apresenta a este setor é, atualmente, o aumento da sua sustentabilidade. Esta sustentabilidade deve ser encarada no sentido lato, que envolve a sustentabilidade social, ambiental, energética e económica, a necessidade de preservar o futuro da humanidade, designadamente no que se refere à redução da emissão de gases com efeitos de estufa, sem com isso interromper o seu natural desenvolvimento [21].

Outro fator estruturante para o setor da construção é a digitalização da economia, que exige a sua adaptação a novos conceitos e a implementação de novas ferramentas, que envolvem a integração de novas tecnologias e a reformulação das cadeias de abastecimento de forma a melhorar o seu funcionamento global. Nesta área destaca-se a metodologia BIM (Building Information Modelling) considerada como tecnologia de suporte à digitalização do setor da construção, pois se por um lado permite a simulação e a modelação das construções, por outro facilita a gestão da crescente complexidade dos processos de construção. Prevê-se que esta tecnologia permitirá a integração de toda a informação produzida ao longo do ciclo de vida das construções [22], [23].

Esta nova visão, focada na sustentabilidade e na digitalização, impõe uma nova forma de atuação. Os desafios atuais centram-se na procura de fazer mais com menos, erguer construções mais resistentes, mais adequadas à natureza humana, mais duráveis com menos recursos, sejam energéticos sejam matérias primas. Como não existem soluções que resolvam todos os problemas, terá de ser através da soma de pequenos contributos que se poderá caminhar para o aumento da sustentabilidade do setor [24].

Entre os diferentes materiais de construção, o betão armado destaca-se pela transversalidade da sua utilização. Na realidade, ao longo do último século, o betão tornou-se num dos

principais materiais de construção devido a um conjunto de características que o tornam único, designadamente a facilidade com que é feita a sua modelação, o que permite a sua utilização com todo o tipo de formas, e a existência de matérias primas para a sua produção em praticamente todas as geografias [25].

A utilização do betão armado remonta ao século XIX, tendo resultado do desenvolvimento de estudos sobre as propriedades e fabrico do cimento, que conduziram à aprovação da patente do cimento Portland em 1824 apresentada por Joseph Aspdin. Este ligante foi obtido a partir de calcários argilosos, transformados em pó muito fino após serem moídos e sujeitos a altas temperaturas, originando uma pedra artificial muito parecida com os calcários da região de Portland em Inglaterra o que originou a sua designação. No entanto, a descoberta original do cimento é, geralmente, atribuída ao engenheiro Inglês John Smeaton, e terá ocorrido por volta de 1756. Posteriormente Louis-Joseph Vicat estudou a forma como a mistura de pedras de argila e calcário devidamente moídas e cozidas poderiam originar o ligante hidráulico, tendo em 1818 conseguido produzir cimento artificial [26], [27].

No fim da primeira metade do século XIX surgem as primeiras referências ao betão armado, que resultou da introdução de ferro nas zonas onde o betão iria estar sujeito a esforços de tração. A primeira patente relativa ao betão armado data de 1849, que corresponde a caixas para servirem de floreiras, apresentada por Joseph Monier. Mas a primeira obra terá sido um barco construído por Jean-Louis Lambot datada de 1849 [28], [29]. O engenheiro François Hennebique construiu em 1892 o primeiro edifício de betão armado em Paris, tendo contribuído de modo decisivo nas décadas seguintes para a expansão da utilização do betão armado. A sua empresa iniciou em 1898 a publicação da primeira revista periódica dedicada ao betão armado, designada de "Le Beton Armé", que serviu para a divulgação e promoção das obras efetuadas com os seus sistemas construtivos [27]. Na Figura 1 está representada uma viga do sistema Hennebique.



Figura 1 - Viga armada segundo o sistema Hennebique [30].

No século XX a utilização do betão generalizou-se [31], conduzindo à necessidade de criar regulamentos e normas de utilização deste material. Em França surgiram as primeiras instruções para a utilização do betão armado em 1906, que foram utilizadas em Portugal, sem qualquer tipo de obrigatoriedade legal, até à produção de legislação própria em 1918. Entre nós, os principais documentos normativos publicados, relativos à utilização do betão, foram os seguintes por ordem cronológica:

- 1918 - Decreto nº 4036 de 28 de Março, "Regulamento para o emprego do beton armado" [32], que viria a ser revogado em 1935;
- 1935 - Decreto nº 25948 de 16 de Outubro, "Regulamento do betão armado" [33], que viria a ser revogado em 1967 - incorporou os conhecimentos científicos e tecnológicos entretanto alcançados;
- 1967 - Decreto nº 47723, de 20 de Maio, "Regulamento de estruturas de betão armado" [34], que viria a ser revogado em 1983 - quando comparado com a norma anterior, para além da incorporação de novos conhecimento técnicos, destaca-se a autonomização das regras relativas às solicitações e, parcialmente, à tecnologia do betão, que passaram a ser tratados em documentos específicos;
- 1983 - Decreto-Lei nº 349-C/83, de 30 de Julho, "Regulamento de estruturas de betão armado e pré-esforçado" [35], em vigor - esta norma atualiza a anterior do ponto de vista do conhecimento científico e incorpora as estruturas de betão pré-esforçado;
- 2018 (data prevista) - por Decreto-Lei será publicado o novo regulamento "NP EN 1992-1:2010 -Eurocódigo 2 - Projeto de estruturas de betão" [36], não sendo ainda de aplicação obrigatória, já é amplamente utilizado.

São fatores relevantes para a durabilidade de uma estrutura de betão armado a espessura da camada de recobrimento, assim como a sua constituição, que depende da dosagem de cimento e da relação água/cimento, pois são determinantes para o nível de porosidade do material e consequentemente da sua permeabilidade. Analisando os documentos normativos acima referenciados, podemos verificar que existe uma continuidade na regulamentação portuguesa no que se refere à dosagem de referência de cimento, aparecendo recorrentemente o valor de 300 kg/m³ de cimento, o que poderá ser visto como uma forma de garantir um nível mínimo de qualidade do betão.

Do ponto de vista da dosagem de água, pode perceber-se, através da regulamentação, que a consciência da sua importância evoluiu ao longo do tempo. O regulamento de 1918 determinava que deveria ser o responsável do trabalho a regular a quantidade de água por depender da temperatura, da natureza e humidade dos materiais e doutras circunstâncias. No regulamento de 1935 impõe-se um acréscimo de 20% da dosagem de cimento quando se usam betões fluídos. Nos regulamentos subsequentes a dosagem de água já é controlada em função do tipo de exposição ambiental.

A espessura de betão da camada de recobrimento das armaduras não foi alterada significativamente ao longo do tempo, na Tabela 1 apresentam-se as espessuras mínimas para esta camada. A introdução da normalização europeia relativa a betões, já em aplicação através das NP EN 206 [37] e NP EN 13670 [38] e da especificação do LNEC E464 [39] vem alterar as espessuras e o modo como o betão da camada de recobrimento era tratado, integrando um conjunto de requisitos mínimos em função do tipo de exposição ambiental. De forma simplificada, estas normas alargam o número de classes de exposição, passando a existir 13 em vez de três, e definem um conjunto de requisitos para cada uma delas. Estes requisitos incluem recobrimento das armaduras, dosagem mínima de cimento, relação A/C máxima e classe mínima de resistência. Na Tabela 2 apresentam-se os valores para a camada de recobrimento em função da classe de exposição, que incluem os valores do recobrimento mínimo e do recobrimento nominal, que resulta da soma do primeiro com a tolerância de execução definida na EN NP 13670 que é de 10mm em Portugal.

Tabela 1 - Camada de recobrimento das armaduras segundo as diferentes legislações nacionais.

Camada de recobrimento (mm)					
Dec. nº 4036 (1918)	Elemento	Vigas e Pilares			Lajes
	Mínimo	20			10
	Recobrimento > 1,5 ϕ da armadura				
Dec. nº 25948 (1935)	Em ambientes	Protegido	Ar livre	Líquidos, gases ou vapores nocivos	Água do mar
	Lajes	10	15	20	40
	Vigas e pilares	15	20	> 20	
Dec. nº 47723 (1967)	Em ambientes	Protegido	Ar livre	particularmente agressivos	
	Mínimo	10	20	entre 20 e 40	
	Recobrimento > ϕ da armadura				
DL nº 349-C/83 REBAP (1983)	Em ambientes	Pouco agressivos	Moderadamente agressivos		Muito agressivos
	Mínimo	20	30		40

Comparando a Tabela 1 e a Tabela 2 pode observar-se que existe uma clara evolução nesta transição regulamentar que se está agora a processar, resultado da multiplicação dos estudos relativos ao comportamento do betão, tanto ao nível da resistência como ao nível da durabilidade.

Tabela 2- Camada de recobrimento das armaduras segundo a NP EN 1992 [36].

		Camada de recobrimento (mm)					
Classe de exposição ambiental		X0	XC1	XC2/XC3	XC4	XD1/XS1	XD2/XS2
Classe estrutural S4 (50 anos de vida útil de projeto)	Mínimo	10	15	25	30	35	40
	Nominal	20	25	35	40	45	50

2.2. Impacto ambiental da utilização de betão armado

A sustentabilidade de um material é aferida em função do seu impacto ambiental, no caso do betão o seu impacto, por unidade de volume, ser limitado quando comparado com outros materiais de construção, as emissões de dióxido de carbono que lhe estão associadas são grandes em consequência da sua utilização intensiva. Assim, mais do que procurar a substituição do material, interessa procurar formas de mitigar o seu impacto ambiental [40].

O constituinte do betão com maior impacto em termos emissões de CO₂ é o cimento, cuja produção origina entre 0,5 e 0,8 kg CO₂/kg cimento. O principal composto do cimento portland é o clínquer cujo fabrico envolve a calcinação de uma mistura de calcário e argila a elevadas temperaturas. A transformação do calcário (CaCO₃) em óxido de cálcio (CaO) faz-se com a libertação de dióxido de carbono, conforme se ilustra na Figura 2. Este processo é o principal responsável pelas emissões de CO₂ do cimento, pelo que a utilização de uma menor quantidade de clínquer no cimento contribui para a redução das emissões de CO₂ deste [41].

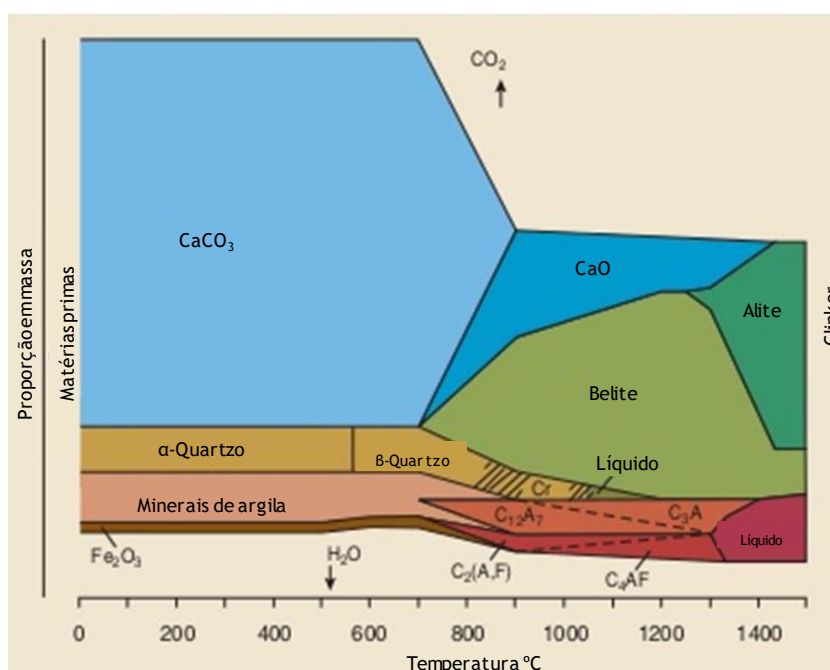


Figura 2 - Processo de transformação do calcário e da argila em clínquer em função do aumento da temperatura, adaptado de [42].

A figura seguinte mostra os principais produtores mundiais de cimento e as respetivas quantidades produzidas ao longo do período 2012-2017. Pode observar-se que a China lidera a produção mundial de cimento com uma produção superior a 50% da produção mundial que ronda os 4100 Milhões/ano [43].

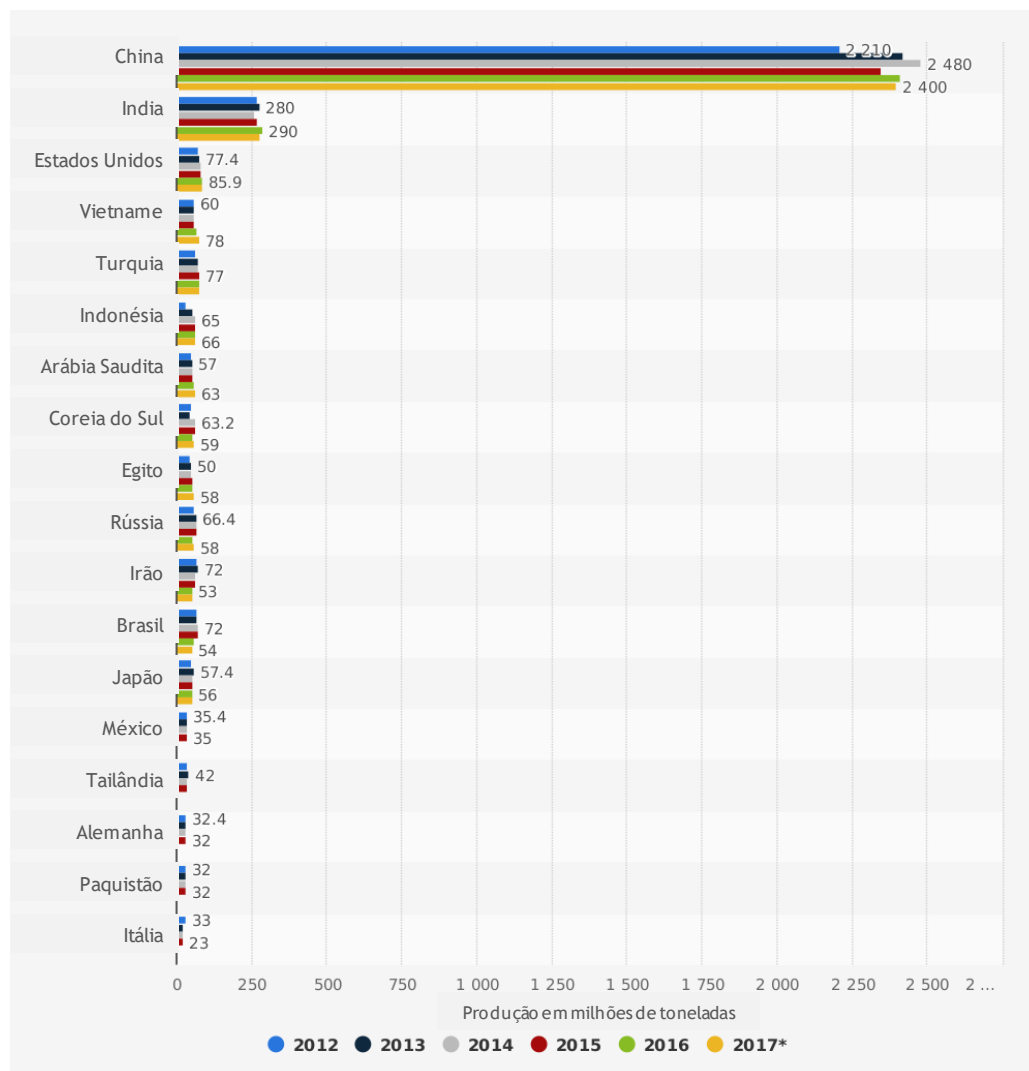


Figura 3 - Principais produtores mundiais de cimento nos anos 2012 a 2017 (MTon), adaptado de [43].

Na Europa, segundo os dados obtidos a partir das estatísticas da ERMCO (*European Ready Mixed Concrete Organization*), o consumo de cimento reduziu ao longo da última década, resultado da crise vivida na União Europeia, dando agora sinais de inversão da tendência, conforme se ilustra na Figura 4. Portugal e Espanha seguiram a mesma tendência dos outros países da União, estando o consumo de cimento em Portugal a aumentar segundo os mais recentes dados do EMPIC (Instituto dos Mercados Públicos, do Imobiliário e da Construção, I.P.), apontado para valores da ordem dos 2,6 Milhões de Toneladas de cimento vendidas em 2017.

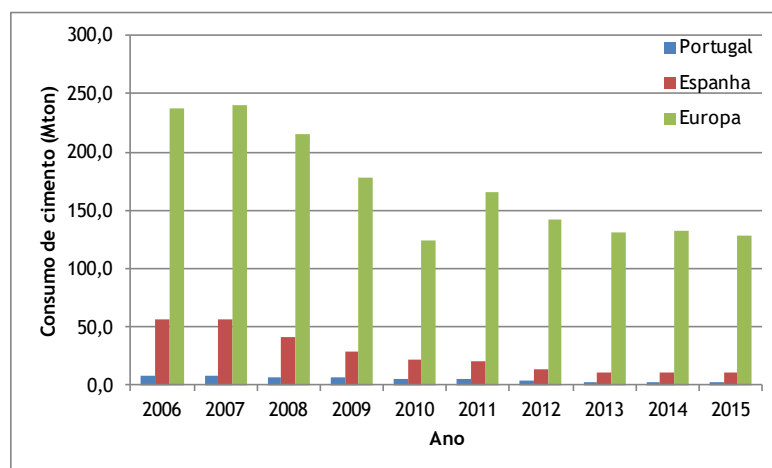


Figura 4 - Consumo de cimento entre 2006 e 2015 em Portugal, Espanha e na EU (Fonte: ERMCO).

A intensidade carbónica da produção do betão tem vindo a diminuir ao longo dos últimos anos resultado dos esforços da indústria e da pressão criada pela necessidade de limitar a produção de gases com efeitos de estufa. Segundo o relatório "Low Carbon Technology Partnerships initiative Action for Impact" [44], os investimentos que têm sido feitos pela indústria do cimento, desde os anos 90, na melhoria da eficiência dos fornos, substituição de combustíveis fósseis, aumento da utilização de biomassa e aumento da eficiência da mineralogia do clínquer, contribuíram para a redução da intensidade das emissões de dióxido de carbono em cerca 17%. Na Figura 5 apresentam-se as emissões de CO₂ em kg por tonelada de cimento produzido pelos parceiros desta iniciativa no período entre 1990 e 2014, segundo WBCSD [45].

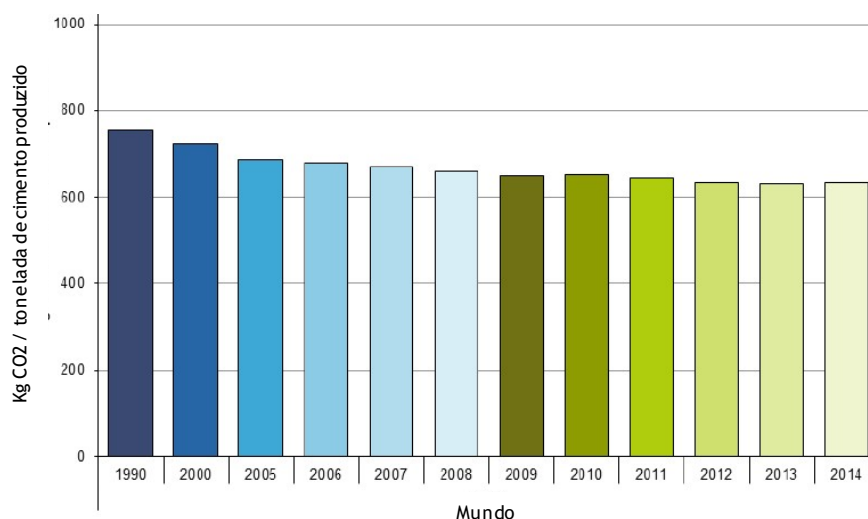


Figura 5 - Emissões de CO₂ em kg/tonelada de cimento produzido entre 1990 e 2014, adaptado de [45].

Devido à sua constituição e ao modo como é produzido, são diversas as abordagens que se podem estabelecer com o intuito de mitigar o impacto ambiental e energético do betão. Se a abordagem for em torno dos materiais constituintes do betão, é possível substituir parte dos agregados naturais utilizados na sua produção por agregados provenientes de resíduos da construção e/ou demolição. Esta substituição de agregados tanto se pode fazer ao nível dos

agregados grossos, como ao nível dos agregados finos. Também ao nível dos materiais constituintes do betão é possível efetuar a substituição de parte do ligante original, o cimento, por cinzas resultantes de processos industriais ou da queima de resíduos com fins energéticos. Neste campo é possível reduzir a utilização de clínquer na produção de cimento e a sua substituição por materiais cimentícios suplementares (SCM), tais como calcário, cinzas volantes (FA), escória de alto forno granulada (GGBS) [46]. A obtenção de novos ligantes, por ativação alcalina de materiais ricos em alumínio e silicatos, tais como alguns dos resíduos da indústria mineira, podem ser obtidos com menores consumos de energia do que a necessária para a produção do cimento Portland [47], [48]. Para a utilização destes novos materiais é preciso aferir se as condições de proteção contra a corrosão das armaduras de aço inseridas no betão estão garantidas [49]. Esta dupla abordagem permite reduzir o impacto ambiental e energético do betão pela redução da necessidade de agregados naturais, redução da produção de cimento e pela utilização de cinzas (resíduos) provenientes de outras atividades [50].

Outra forma de mitigar os impactos da utilização do betão passa por aumentar a sua longevidade. A durabilidade do betão depende de fatores complexos como a sua constituição, designadamente a quantidade de ligante e a relação A/C, ou as condições ambientais a que está exposto. Em geral, a durabilidade aumenta com a redução da porosidade do betão e, consequentemente, com o aumento da sua resistência mecânica, o que pode ser obtido através da escolha das melhores soluções entre agregados, ligantes e relação A/C. Pacheco et al.[51], afirmam que é possível reduzir as emissões de CO₂ através da utilização de betões de elevada resistência, porque, apesar de incorporarem maiores quantidades de cimento por unidade de volume, permitem o dimensionamento de peças com menores dimensões.

Como a durabilidade do betão armado está dependente do comportamento das armaduras nele inseridas, a utilização de sistemas de proteção por inibição do processo de corrosão pode contribuir para aumentar a sua vida útil. Estes sistemas podem atuar através do aumento da polarização anódica ou catódica, reduzindo o movimento de iões na superfície da armadura ou aumentando a resistência elétrica da superfície metálica. Os inibidores de corrosão podem ser classificados em função do mecanismo eletroquímico (anódico, catódico ou ambos), dos produtos usados (orgânicos e inorgânicos) ou em função da aplicação (misturado no betão ou aplicado sobre este, inibidores migratórios). Os inibidores anódicos formam uma película protetora insolúvel para passivar o aço, através da transferência do potencial para a zona de passivação, com a formação de uma película passiva nos locais anódicos - aumenta o potencial do ânodo e diminui a taxa de corrosão. Inibidores catódicos retardam a corrosão, reduzindo a taxa de reações catódicas no ambiente de corrosão. Um inibidor catódico causa a formação de compostos insolúveis precipitando nos locais catódicos na forma de um filme barreira. A Figura 6 apresenta o esquema de classificação das diferentes soluções de inibidores de corrosão proposto por Lee et al. [52].

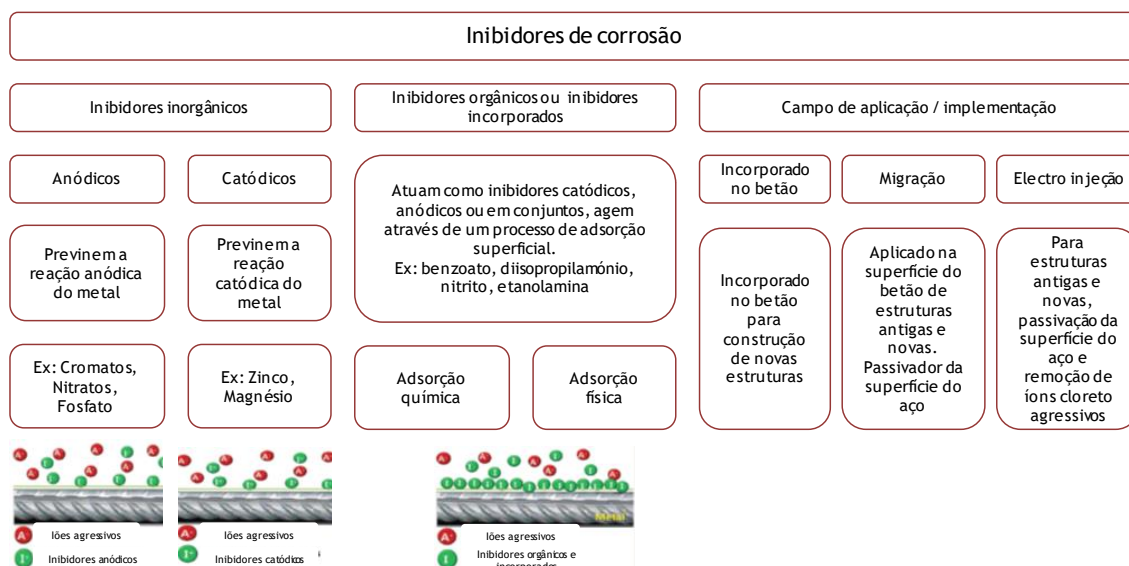


Figura 6 - Classificação de inibidores de corrosão, adaptado de [52].

O tratamento da superfície do betão, através da aplicação de produtos hidrorrepelentes, impregnações ou revestimento por pintura, pode contribuir para retardar o início do processo de corrosão das armaduras, através imposição de uma barreira que limita o acesso de agentes agressivos ao betão de recobrimento. Na Figura 7 estão representados estes três tipos de tratamento de superfície segundo a EN 1504-2 [53].

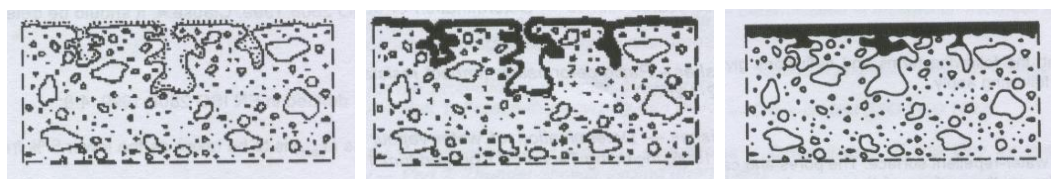


Figura 7 - Impregnação hidrofóbica (esq.), impregnação (centro) e revestimento por pintura (dir.) [53].

A impregnação hidrofóbica caracteriza-se pela criação de uma superfície repelente à água, através do revestimento da superfície dos poros e capilares, não preenchendo os poros do betão. Este tipo de solução tende a manter inalterada a aparência dos materiais. A impregnação é um tratamento através do qual se pretende criar uma película fina e descontínua sobre a superfície do betão, preenchendo de forma parcial ou total os seus poros. O revestimento por pintura visa a criação de uma barreira à superfície do betão cuja espessura pode, em geral, variar entre 0,1 e 5 mm.

Num estudo efetuado por Medeiros et al. [54] onde se comparou o comportamento de diversos sistemas de tratamento superficial indicados na Tabela 3, designadamente sistemas hidrofóbicos, de impregnação e de revestimento, concluiu que o efeito destes tratamentos de superfície do betão, em termos de proteção contra migração dos íons cloreto, depende, não só do sistema adotado, mas também da espessura da camada de recobrimento existente, já que quanto mais espessa for esta camada maior será o impacto do tratamento de superfície.

Tabela 3 - Sistemas de tratamento superficial utilizados no estudo de Medeiros e al. [54].

Tratamento de superfície		
Tipo	Tipo	Descrição
Impregnação hidrofóbica	Repelente de água	Silanos / siloxanos dispersos em água
Impregnação	Silicato de sódio	Produto à base de silicato de sódio comercializado para proteção e impermeabilização do betão
Revestimento superficial	Acrílico	Verniz acrílico (disperso em solvente)
	Poliuretano	Verniz de poliuretano (bicomponente)

Tendo em consideração que a corrosão das armaduras de aço corrente é um dos principais fatores de degradação das estruturas de betão, a procura de soluções alternativas tem merecido a atenção de inúmeros investigadores. Estudos recentemente desenvolvidos envolvem a utilização de aço tratado ou protegido e o recurso a materiais alternativos.

Segundo Lee et al. a utilização de um revestimento à base de epóxi em armaduras de aço funciona como uma barreira elétrica e iónica que restringe o desencadear do processo de corrosão. Quando comparada com as armaduras correntes, esta solução prolonga a fase de iniciação por promover o aumento da concentração crítica de cloretos e limita as taxas de corrosão devido à redução de áreas catódicas. Nos Estados Unidos tem sido utilizada esta técnica em armaduras expostas a ambientes marinhos [55].

A galvanização é um processo através do qual as barras de aço são revestidas com zinco, por imersão em zinco fundido a temperaturas da ordem dos 435 a 460° C. Esta solução aumenta a resistência à corrosão do aço pela criação de uma barreira ao ataque químico que também serve de camada sacrificial. A espessura desta camada deve ser limitada a valores da ordem dos 200 µm, pois espessuras superiores podem ser danificadas nos processos de dobragem das armaduras. A formação de um filme passivo sobre o zinco depende da existência de oxigénio ou de teores elevados de humidade, como ocorre no betão durante a betonagem. Esta camada protetora mantém-se estável para valores de pH superiores 8, mas na faixa de valores inferiores a 11,5 é suscetível a fenómenos de corrosão localizada [56]. Assim, para além da proteção conferida pelo zinco ao aço através da criação de uma camada protetora, também se estabelece uma proteção catódica, que é visível em ambientes que contem iões cloretos, trata-se da proteção por ânodos de sacrifício. Outro sistemas de proteção catódica tem por base a aplicação de uma corrente elétrica catódica, com recurso a uma fonte de energia externa, entre a armadura e um ânodo externo, de modo a polarizar a armadura catodicamente e inibir a existência de reações anódicas, este sistema é designado por proteção catódica de corrente impressa (ICCP) [57].

Entre os materiais alternativos ao aço destacam-se os polímeros reforçados com fibras (FRP), que podem ser produzidos com fibras de carbono (CFRP) ou com fibras de vidro (GFRP). O potencial de utilização destes materiais em estruturas de betão está relacionado com as suas características especificadas, nomeadamente devido a serem insensíveis à corrosão, apresentarem um coeficiente de dilatação semelhante ao do betão, possuírem uma elevada resistência mecânica e peso reduzido. Por outro lado, ao não serem afetadas por campos magnéticos, as armaduras de FRP podem ser utilizadas em estruturas onde este tipo de condicionante limita a utilização de armaduras correntes. Entre as desvantagens destacam-se a sua fragilidade que limita os alongamentos antes da rotura ao contrario do que acontece com o aço que suporta grandes alongamentos [58]. Como a corrosão das armaduras é o principal responsável pela necessidade de obras de manutenção em estruturas de betão, a utilização de FRP tenderá a reduzir os custos de manutenção deste tipo de estruturas [59].

Também a monitorização das estruturas pode contribuir para o aumento da vida útil do betão, por permitir a deteção precoce dos fenómenos de degradação do betão. Este tema será abordado com mais detalhe ao longo deste trabalho.

2.3. Tipologias de degradação

A durabilidade das estruturas de betão armado decorre dos efeitos produzidos pelos mecanismos de degradação a que estão sujeitas. Estes mecanismos podem conduzir a alterações das propriedades mecânicas, físicas ou químicas da estrutura, e manifestar-se através do aparecimento de fendilhação, desagregação e destacamento do betão ou através da corrosão ou rotura das armaduras.

A degradação do betão pode ter origem em causas humanas, ações naturais ou ações de acidente. Entre as causas humanas para a degradação das estruturas podem estar causas associadas à conceção e projeto, à execução e à utilização da estrutura. As causas devidas a ações naturais podem ser de origem física (vento, água ou poluição do ar), química (carbonatação, penetração de cloretos ou ataque por sulfatos) e biológica (raízes, fungos ou ação das águas residuais). As causas associadas a acidentes podem ser de origem natural (sismos, cheias ou deslizamentos de terras) e de origem humana (incêndios, explosões ou choques).

Os principais fenómenos associados à degradação das estruturas de betão armado classificam-se como mecânicos, físicos, estruturais, químicos, biológicos e de corrosão das armaduras, conforme apresentado na tabela seguinte.

Tabela 4 - Principais fenómenos de degradação das estruturas de betão armado.

Fenómenos de degradação das estruturas de betão armado	
Mecânicos	Abrasão
	Atrito
	Erosão
	Impactos
Físicos	Cristalização de sais
	Fluência
	Fogo
	Gelo
	Retração
	Variação de temperatura
Estruturais	Fadiga
	Sobrecarga
Químicos	Ácidos
	Álcali-silica
	Sais
Biológicos	Algas
	Bactérias
	Fungos
	Carbonatação
Corrosão das armaduras	Cloretos
	Correntes vagabundas

Entre os fenómenos físicos podem destacar-se a ação dos sulfatos e do gelo. A ação dos sulfatos sobre o betão é uma ação física, e não química, quando desta resulta o aumento de volume dos sais nos poros intersticiais, conduzindo ao desenvolvimento de tensões internas. A degradação do betão por ação do gelo é um fenómeno cíclico que resulta da cristalização da água existente nos poros com aumento de volume que produz microfissuras no interior do betão. Este processo quando repetido ciclicamente vai incrementado a dimensão dos poros e produz a degradação do betão das camadas superficiais. Da ação do fogo resulta um aumento da temperatura do betão e do aço nele inserido.

Nos fenómenos de degradação química do betão são relevantes a ação dos sulfatos e as reações álcali-silica. No caso da ação dos sulfatos resulta a formação de etringite, gesso e taumasite via reação química. Das reações álcali-silica resulta a criação de produtos silício-alcalinos, higroscópicos, com características expansivas que introduzem tensões internas no betão que tendem a originar fissuras.

A corrosão das armaduras é um fenómeno de natureza eletroquímica e resulta do estabelecimento de um circuito elétrico entre as zonas anódicas e catódicas. No ânodo ocorre a dissolução do ferro, com a consequente redução de secção, formam-se iões de ferrosos (Fe^{2+}) e férricos (Fe^{3+}) e libertam-se eletrões, que se movimentam ao longo da armadura para a zona catódica. Ao combinarem-se com o oxigénio presente na zona catódica, dão origem à formação de iões hidroxilo (OH^-), que reagem com os iões de ferro presentes no ânodo, formando ferrugem que se deposita no catodo.

A evolução dos mecanismos de deterioração do betão depende do ambiente onde este está inserido, e da microestrutura da pasta de cimento. Neste enquadramento pode destacar-se a importância da humidade nos processos de deterioração precoce do betão, cuja ação depende da permeabilidade do betão o que torna este fator fundamental para se poder estimar a durabilidade deste material. A permeabilidade influencia de forma determinante, não só o transporte de humidade, mas também o transporte de iões agressivos para o interior do betão, conduzindo subsequentemente o aumento das propriedades de permeação ao aumento da taxa de danos. Na Figura 8 mostra-se um modelo desenvolvido por Basheer [60], onde se pode observar a importância da permeabilidade nos mecanismos de transporte de agentes agressores do betão [61].

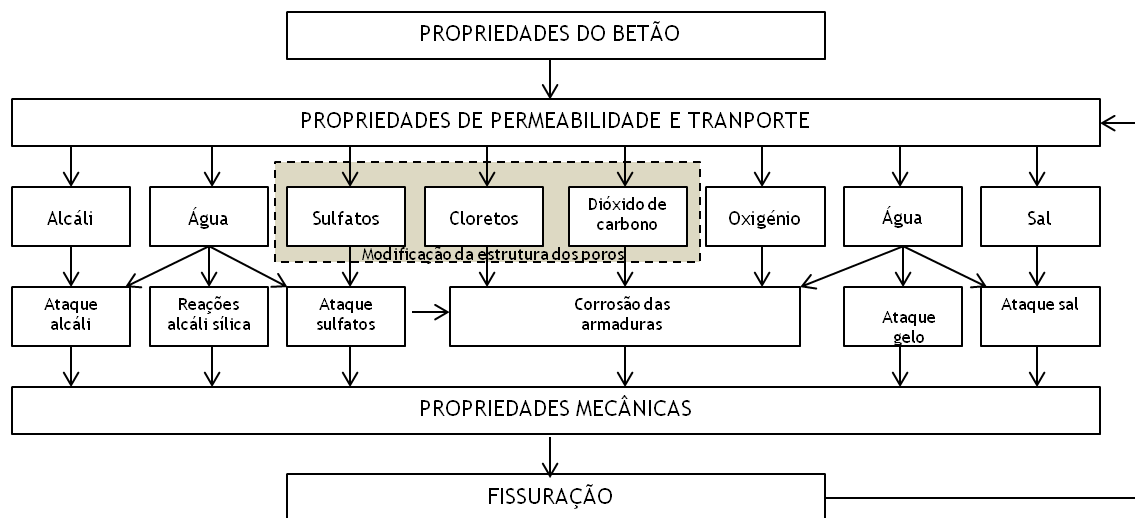


Figura 8 - Causas da deterioração do betão - modelo de interação, adaptado de [61], adaptado de [60]

2.4. Principais fatores da degradação do betão armado

2.4.1. Permeabilidade e Porosidade

A permeabilidade de um material pode definir-se como sendo a maior ou menor facilidade com que um fluído, líquido ou gasoso, penetra no seu interior. A porosidade mede o volume de vazios de material, sendo geralmente apresentada pela relação entre o volume de vazios e o volume total. A permeabilidade está intrinsecamente ligada à sua estrutura porosa e ao nível de fendilhação existente, na medida em que exista continuidade na estrutura porosa, sendo este um dos principais fatores que condiciona a sua durabilidade, em termos de interação com fenómenos físicos e químicos [62], [63]. A durabilidade de uma estrutura de betão está relacionada com a sua capacidade de contrariar o ingresso de substâncias agressivas, tais como o dióxido de carbono, os cloretos ou os sulfatos. Estas substâncias penetram nos materiais cimentícios, no estado gasoso ou dissolvidas em água, por diversos mecanismos de transporte bastante complexos, designadamente por sucção capilar, convecção, e difusão [64]. Na Figura 9 apresentam-se os principais fatores envolvidos nos processos de

transporte de agentes da degradação do betão armado na ótica do desenvolvimento de fenómenos de corrosão.

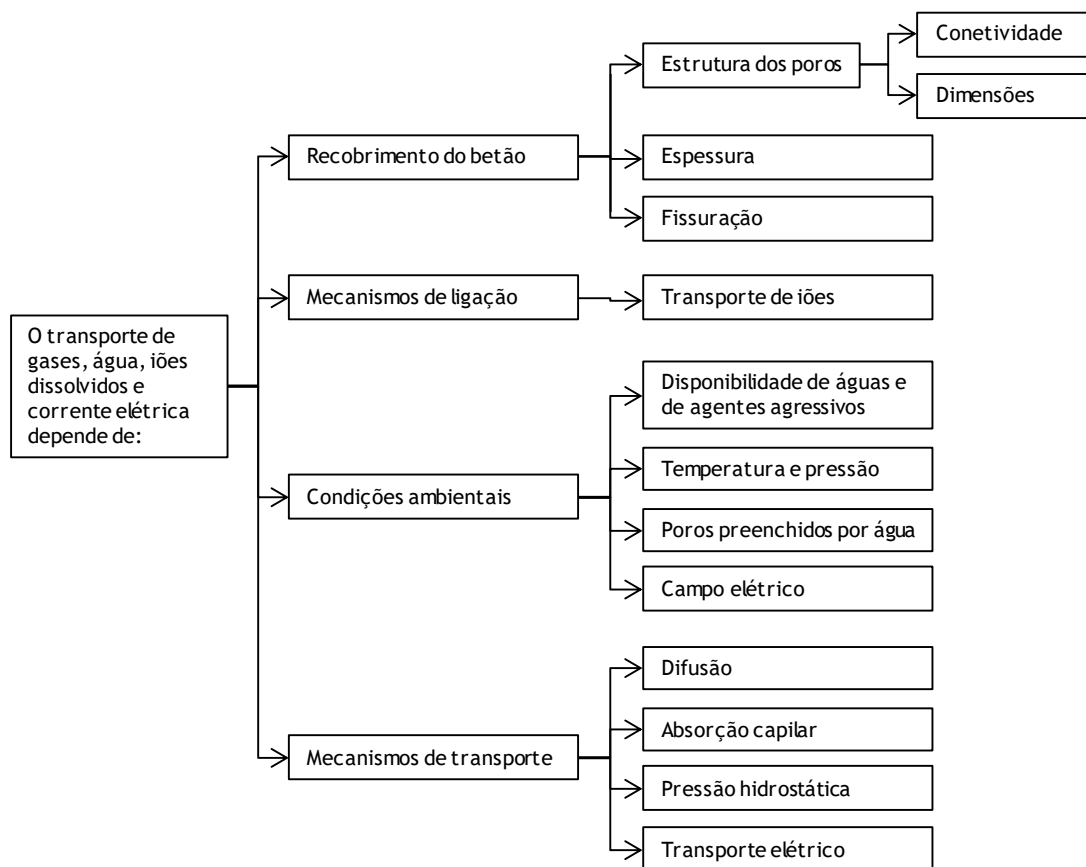


Figura 9 - Principais fatores envolvidos nos processos de transporte no betão, essenciais para os fenómenos de corrosão, adaptado de [63].

Como referido, a permeabilidade do betão está relacionada com a estrutura dos poros, que é determinada pela matriz de pasta de cimento, na medida em que existam interligações entre os poros de modo a permitir a circulação de água, gás ou vapor, dependendo da dimensão, distribuição, forma, tortuosidade e continuidade dos poros [65], [66]. Esta estrutura resulta de uma elaborada interação de fatores entre os quais se destacam o tipo e quantidade do ligante utilizado no fabrico do betão, os aditivos, a relação água/ligante e grau de hidratação do cimento. A água é um elemento essencial à preparação dos betões, devendo a sua dosagem ser a adequada, de modo a permitir a hidratação do cimento e criar condições de trabalhabilidade do betão fresco, já que atua como agente plastificante. Por outro lado, a água em excesso, que fica alojada no betão durante o processo de cura, contribui para a formação de poros indesejáveis [67]. Na Figura 10 apresenta-se a influência da relação A/C na permeabilidade do betão.

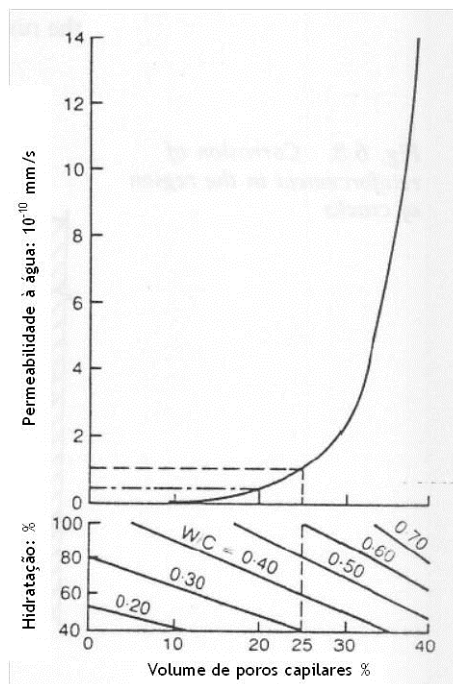


Figura 10 - Influência da razão A/C na permeabilidade, adaptado de [62].

O processo de hidratação ocorre com aumento do volume dos produtos hidratados relativamente ao volume sólido inicial, contribuindo para a segmentação dos poros capilares, e consequente redução da porosidade [65]. Nos betões mais antigos a taxa de hidratação é maior e, consequentemente, mais desenvolvida será a sua estrutura porosa. Este fenómeno é mais importante em betões produzidos com adições que conduzam a reações mais lentas, tais como as cinzas volantes, que quando utilizadas na produção de betões tendem a reduzir a sua permeabilidade [68].

A cura do betão desenvolve-se após a sua colocação e compactação, revestindo-se de particular importância, pois é durante a cura que ocorrem as diversas reações de endurecimento do betão. Entre os fatores que condicionam a cura estão a temperatura e a humidade. Se por um lado, temperatura condiciona fortemente a velocidade de endurecimento, por outro, a humidade é fundamental para garantir a hidratação da pasta de cimento que permite o desenvolvimento contínuo de reações e consequente segmentação capilar, reduzindo a permeabilidade do betão.

A temperatura de hidratação tem implicações na estrutura porosa do betão. Assim, quando esta ocorre a temperaturas mais altas o betão ganha resistência mecânica mais cedo, tendo menor porosidade nos primeiros dias, mas a prazo, são os betões cuja cura ocorre a temperaturas mais baixas e, consequentemente, mais lentamente aqueles cuja porosidade é menor, conforme Figura 11.

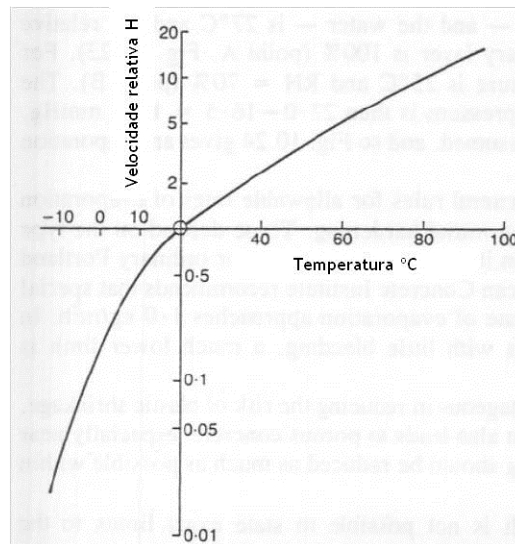


Figura 11 - Velocidade das reações em função da temperatura, adaptado de [62].

Outro parâmetro relevante no processo de cura do betão é a cofragem utilizada na moldagem das peças, que condiciona o nível de humidade na camada de recobrimento durante a fase de secagem, influenciando, consequentemente, a porosidade do betão. A utilização de cofragens de permeabilidade controlada pode contribuir para a melhoria do desempenho da camada de recobrimento através do controlo da quantidade de água acumulada à superfície, pela retenção das partículas de cimento durante a fase de compactação e pelo contributo para a expulsão de bolhas de ar [69].

A estrutura dos poros do betão é, genericamente, classificada em três níveis, os macro poros, cuja dimensão se situa entre 5×10^{-3} e 5×10^{-5} m, os poros capilares, com dimensões situadas entre 5×10^{-5} e 5×10^{-8} m, e os micro poros, também designados poros de gel, com dimensão inferior a 10^{-7} m. Na Figura 12 apresenta-se a distribuição dos poros em função da dimensão segundo Setzer [70].

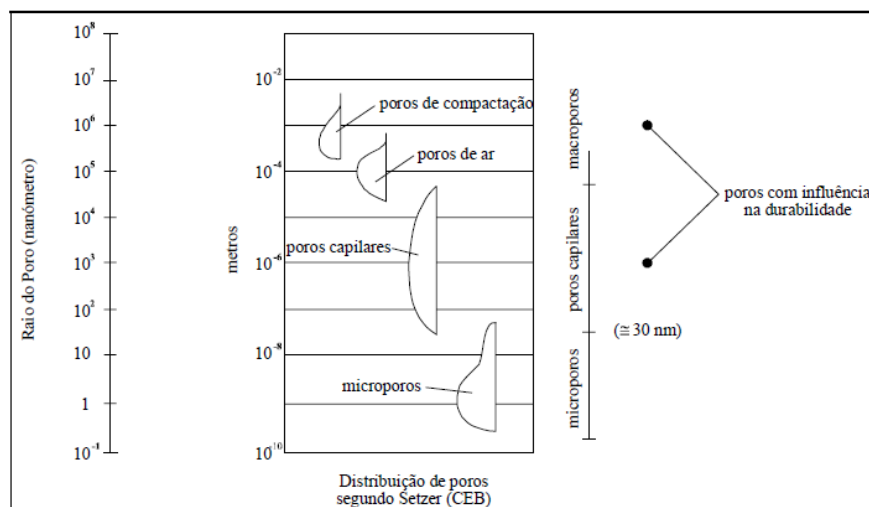


Figura 12 - Distribuição dos poros em função da dimensão segundo Setzer, adaptado de [70].

A penetração de um fluido num material está relacionada com a sua durabilidade na medida em que este pode servir de meio de transporte de agentes agressivos para o seu interior. No caso do betão este processo está associado à ação dos principais agentes da sua degradação, tais como a carbonatação, que ingressa por meio gasoso, os cloretos ou os sulfatos, que penetram dissolvidos em meio aquoso. Os mecanismos de transporte de fluidos no betão são três, a saber adsorção, convecção e difusão.

A absorção capilar é o primeiro processo que se desencadeia quando o betão é exposto à água, à medida que a humidade aumenta a água vai enchendo os poros, primeiro os mais pequenos e posteriormente os maiores. Este processo desenvolve-se porque a superfície livre dos sólidos possui excesso de energia devido à falta de elementos de ligação às moléculas adjacentes, dependendo a espessura da camada de água da humidade existente nos poros. Como a razão entre a área superficial dos poros sobre o seu volume aumenta com a redução de do raio dos poros, os poros com menores raios são preenchidos com água, processo que se designa por condensação capilar [62]. A consequência do processo de saturação dos poros capilares é a redução da permeabilidade aos gases e, no limite, quando os poros estão saturados o betão torna-se impermeável aos gases.

A permeação resulta da existência de uma pressão hidrostática (fluxo hidráulico) sobre o material. Esta propriedade é equacionada pela lei de Darcy, que afirma que a taxa de fluxo de um fluido no estado estacionário é diretamente proporcional ao gradiente hidráulico [71], aumentando o caudal escoado em função do aumento da porosidade e reduzindo com o aumento da sua viscosidade. Sendo a velocidade de escoamento a razão entre o caudal por unidade de área, o gradiente hidráulico é o quociente entre a pressão aplicada à superfície do betão e a distância percorrida.

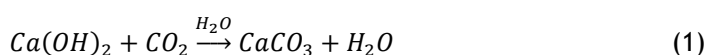
A difusão é um processo através do qual um composto é transportado para o interior do betão devido ao gradiente de concentração. Resulta de pequenos movimentos moleculares aleatórios, que ocorrem em pequenas distâncias. O progresso da difusão é muito mais rápido nos gases (p.e. dióxido de carbono) do que nos líquidos (p.e. soluções com iões cloreto). A difusão pode ser medida através do fluxo de um composto por unidade de área na qual a massa se move. Baseia-se na primeira lei de difusão de Fick que diz que a taxa de transferência de massa através da área unitária de uma secção é proporcional ao gradiente de concentração e ao coeficiente de difusão [71], [72]. Para condições não estacionárias, como ocorre com as estruturas exposta à água do mar, em que a concentração na face do betão muda ao longo do tempo, aplica-se a segunda lei de Fick, que permite descrever o processo de difusão ao longo do tempo [73].

2.4.2. Carbonatação

A carbonatação é um fenómeno originado pela reação do carbono atmosférico (CO_2) com os produtos do cimento hidratado na presença de humidade, da qual resulta a formação de carbonato de cálcio. Este processo ocorre no betão, com maior ou menor velocidade em função da porosidade aberta, e tem como consequência a redução da alcalinidade do betão, conduzindo a prazo à destruição da camada de óxido de ferro que protege as armaduras da corrosão [74]. Quando a frente de carbonatação atinge a zona das armaduras, reduzindo o pH do betão para valores inferiores a 9, é eliminada a camada de óxido de ferro que protege as armaduras, permitindo, na presença de um oxidante, água ou oxigénio, a corrosão das armaduras.

A alcalinidade do betão tem origem na composição do cimento portland, constituído por cerca de 60% de óxido de cálcio e que, após um complexo processo de hidratação, origina o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2). Durante a cura do betão a hidratação da pasta de cimento conduz à saturação dos seus poros com substâncias alcalinas, designadamente o já referido Ca(OH)_2 e, apesar de existirem em menores quantidades na composição do betão, o NaOH e o KOH. Em consequência desta composição o pH dos poros do betão assume valores da ordem 12,5 a 13, ou seja, torna-se alcalino, condição adequada à proteção das armaduras inseridas no betão.

A carbonatação resulta da difusão do CO_2 atmosférico no betão, que avança passando das zonas de maior concentração para as zonas de menor concentração. Trata-se de um processo lento devido à baixa permeabilidade do betão e à baixa concentração de CO_2 na atmosfera. Ao longo deste processo o CO_2 vai reagindo com os hidróxidos existentes nos poros do betão reduzindo o pH, sendo a principal consequência a dissolução de Ca(OH)_2 e a formação de CaCO_3 , conforme equação 1.



Quanto um elemento de betão está exposto à carbonatação podem distinguir-se três estados de evolução. A zona superficial está carbonatada, ou seja, apresenta níveis de formação de CaCO_3 elevados e níveis baixos de Ca(OH)_2 . Uma zona intermédia, designada por frente de carbonatação, onde se estão a desenvolver as reações de dissolução dos hidróxidos NaOH, KOH e Ca(OH)_2 . É nesta zona que se processa uma dupla difusão, a difusão do CO_2 para o interior do betão e a difusão dos hidróxidos em sentido inverso. A terceira zona é a mais profunda e caracteriza-se por não ter sido exposta ao CO_2 . Na Figura 13 está esquematizado este processo.

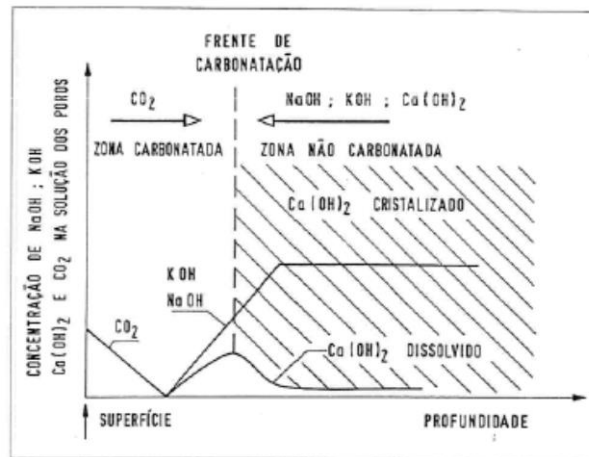


Figura 13 - Esquema do processo de carbonatação do betão adaptado por [75], com base em [2].

Como já foi referido o processo de carbonatação conduz a uma redução do pH nos poros do betão que é assegurada pela existência de substâncias alcalinas nestes. Na Figura 14 pode observar-se a evolução deste processo, estando identificadas uma zona carbonatada, onde já ocorreu a formação de CaCO_3 e a redução de Ca(OH)_2 com a consequente redução do pH. Uma zona intermédia onde o processo de carbonatação se está a desenvolver e a zona mais profunda do betão onde a carbonatação ainda não ocorreu, pelo que o pH se mantém elevado em valores perto de 13.

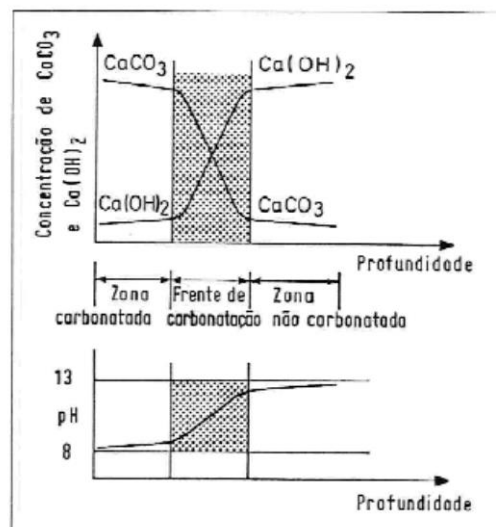


Figura 14 - Variação da concentração $\text{Ca(OH)}_2/\text{CaCO}_3$ e do pH em função da profundidade [75].

A velocidade com que se desenvolve o processo de carbonatação está condicionada por fatores de ordem interna, relativos às características do próprio betão, e por fatores de ordem externa, associados à sua exposição ambiental. No primeiro conjunto de fatores está o tipo e a dosagem de cimento, a relação A/C, as condições de cura e a existência de fissuras. No segundo conjunto de fatores destaca-se a concentração de CO_2 no meio envolvente e a humidade relativa do ar.

Entre os fatores que depende do próprio betão, contribuem para a redução da velocidade de carbonatação uma dosagem elevada de cimento, uma baixa relação A/C, o recurso a cimentos com percentagens baixas de cinzas volantes ou de alto forno e um grau de hidratação da pasta de cimento elevado. Todos estes fatores contribuem para a redução da porosidade e da permeabilidade do betão, reduzindo a velocidade do processo de carbonatação. A existência de fissuras no betão permite o acesso do CO₂ ao seu interior, criando novas frentes de carbonatação em profundidade.

A concentração elevada de CO₂ na atmosfera, que ocorre em alguns ambientes industriais ou em cidades com elevado tráfego rodoviário, contribui para o aumento da velocidade de carbonatação devido à maior disponibilidade de CO₂ para estimular o processo. Os níveis de humidade muito altos ou muito baixos limitam, e podem bloquear mesmo, a difusão do CO₂ no betão.

Determinar a profundidade de carbonatação é um processo complexo tendo em conta a variabilidade dos fatores envolvidos. A primeira teoria utilizada para estimar a posição da frente de carbonatação, baseada na teoria da difusidade, relaciona a profundidade de carbonatação com a raiz quadrada do tempo [2], conforme se apresenta a expressão seguinte:

$$X = k\sqrt{t} \text{ (mm)} \quad (2)$$

Sendo:

k - função da difusidade efetiva do CO₂ no betão e da concentração deste (mm/ano^{0,5});

t - tempo em anos.

Tendo em conta as diferentes variáveis que intervêm no processo de carbonatação foi desenvolvida uma abordagem estatística que conduziu à especificação LNEC E-465 [76]. Esta especificação define dois modelos de cálculo para estimar a profundidade de carbonatação do betão ao fim de um determinado período de tempo. O primeiro modelo é baseado na 1ª lei de Fick, admite estacionário o fluxo de dióxido de carbono no betão, afetando este fluxo de três fatores que tem em consideração as condições do ensaio, a exposição ambiental e a cura do betão (equação 3). O segundo modelo resulta da existência de uma forte correlação entre o coeficiente de difusão e a permeabilidade ao ar no betão.

No primeiro modelo a profundidade de carbonatação é obtida através da seguinte equação:

$$X(m) = \sqrt{\frac{2 \times D \times \Delta c}{a}} \times t \times \left[\sqrt{k_0 \times k_1 \times k_2} \times \left(\frac{t_0}{t} \right)^n \right] \quad (3)$$

sendo:

D - coeficiente de difusão do dióxido de carbono em m²/ano, num ambiente com uma humidade relativa de 65% e à temperatura de 20°C;

Δc - diferença de concentração de dióxido de carbono em kg/m³, entre o exterior e a frente de carbonatação;

a - quantidade de dióxido de carbono que provoca a carbonatação dos componentes alcalinos de betão em kg/m³;

k_0 - fator relativo às condições do ensaio (toma o valor 3 quando os ensaios são efetuados conforme a especificação LNEC E-391);

k_1 - fator que tem em consideração as condições a influência da humidade relativa;

k_2 - fator relativo às condições de cura;

t_0 - período de referência;

n - fator que considera a influência da molhagem/secagem ao longo do tempo.

Sendo a resistência à carbonatação é dada por:

$$R_{C65} = \frac{a}{D} \text{ (kg.ano/m}^5\text{)} \quad (4)$$

pode reescrever-se a equação (3) da seguinte forma:

$$X(m) = \sqrt{\frac{2 \times c}{R_{C65}}} \times t \times \left[\sqrt{k_0 \times k_1 \times k_2} \times \left(\frac{t_0}{t} \right)^n \right] \quad (5)$$

Para se obter a resistência à carbonatação, R_{C65} , com recurso a ensaios acelerados, de acordo com Especificação LNEC E-391, utilizam-se concentrações de CO_2 superiores ao atmosférico ($c_{\text{acel}}=90 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$), obtendo-se R_{C65} através da seguinte expressão:

$$R_{C65} = \frac{2 \times c_{\text{acel}} \times t_1}{X^2} \text{ (kg.ano/m}^5\text{)} \quad (6)$$

A resistência à carbonatação está correlacionada com o tipo de cimento utilizado e a resistência à compressão do betão. A expressão 7 relaciona à R_{C65} com a resistência à compressão de um conjunto específico de betões estudados pelo LNEC e produzidos com cimentos tipo CEMI e CEM II/A [76], [77].

$$R_{C65} = 0,0016 \times \sigma^{3.106} \quad (7)$$

sendo σ a tensão de rutura obtida em ensaios aos 28 dias com cubos de betão.

No segundo modelo de cálculo para a determinação da profundidade de carbonatação proposto pela especificação LNEC E-465, a frente de carbonatação é dada por:

$$X = \frac{a \times k^{0.4} \times t^p}{c^{0.5}} \times k_2 \quad (8)$$

sendo:

a - fator que toma o valor de 150;

k - coeficiente de permeabilidade ao ar do betão da camada de recobrimento (em 10^{-16} m^2);

p - depende da humidade relativa a que o betão esta exposto;

c - teor em óxido de cálcio da matriz de cimento hidratado do betão (kg/m^3);

k_2 - fator que envolve a influência da cura.

2.4.3. Ação dos cloretos

A ação dos cloretos sobre as estruturas de betão armado é um fenómeno geralmente associado ao contacto deste com a água do mar, onde a concentração de cloretos ronda os 21 g/l (costa portuguesa) [72]. O principal efeito da penetração dos cloretos no betão armado é a corrosão das armaduras que, devido à formação de ferrugem e respetivo aumento de volume, produz um acréscimo de tensões no interior do betão em torno das armaduras.

Consequência deste fenômeno é a perda a prazo da secção das armaduras e a degradação física do betão, que pode ocorrer por fendilhação e/ou delaminação.

A penetração dos cloretos no betão ocorre através da sua estrutura porosa, designadamente dos poros capilares contínuos da pasta de cimento, fendas e micro fendas [73]. Este fenómeno envolve a migração, convecção e difusão dos iões cloreto no betão. A migração dos iões cloretos corresponde à absorção capilar, que acontece quando a superfície do betão está seca e a estrutura porosa do betão atrai a água, através de um campo elétrico, para o seu interior. Este efeito, sendo importante por estar associado a ciclos de secagem e molhagem, só afeta significativamente a camada superficial do betão, não tendo impacto na degradação de betões correntes em que as armaduras não estão à superfície. O segundo mecanismo associado à penetração dos cloretos é a permeação que resulta da existência de gradientes de pressão sob a superfície de betão, fenómeno que tem pouco impacto devido à saturação dos poros do betão. A difusão é o mecanismo que está associado ao gradiente de concentração de cloretos e que serve de motor à sua penetração no betão. Para que este processo ocorra, têm de existir nos poros do betão uma fase líquida contínua [78].

A difusão ocorre através de pequenos movimentos moleculares aleatórios que percorrem pequenas distâncias. Este processo, em estado estacionário, pode ser medido através da equação da 1ª Lei de Fick, que permite determinar a taxa de transferência de massa por unidade de área, em função do gradiente de concentração de cloretos [71]. A Figura 15 mostra a proporcionalidade entre o fluxo de cloretos e o gradiente de concentração destes.

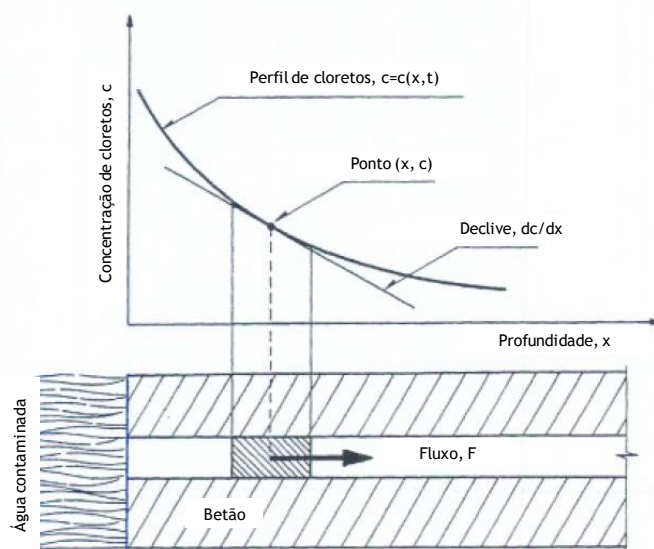


Figura 15 - Fluxo de cloretos (F) em função do seu gradiente de concentração $C(x,t)$, adaptado de [73].

Para estados não estacionários, como nos casos dos testes de imersão mas também nas estruturas imersas, em que apenas uma das faces do betão fica exposta, estabelecendo-se um fluxo unidirecional, o modelo de cálculo mais utilizado para o estudo da penetração dos cloretos no betão baseia-se na teoria da difusão de Fick (2ª Lei de Fick ou equação da difusão),

sendo esta a principal forma de contaminação do betão por iões cloreto [71], [79]. Na Figura 16 esquematiza-se o acréscimo de fluxo em função do incremento de concentração de cloretos no tempo.

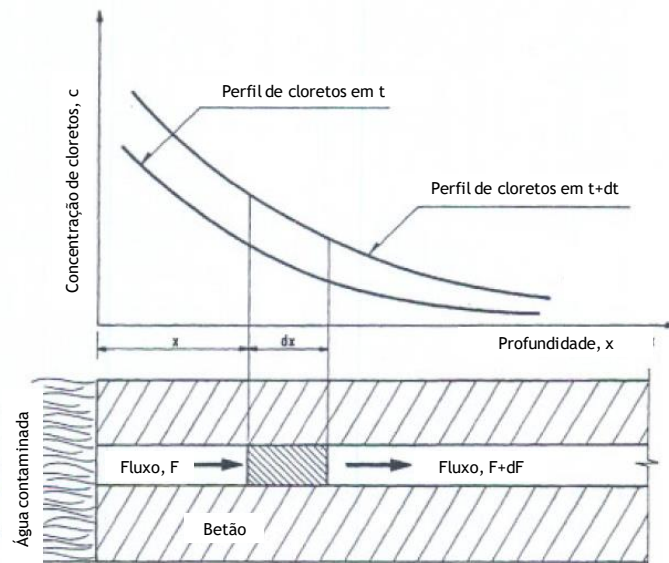


Figura 16 - Aumento do fluxo de cloretos em função do aumento da sua concentração, adaptado de [73].

Os principais fatores que influenciam a suscetibilidade dos betões ao ingresso dos cloretos são os mesmos que determinam a sua estrutura porosa, nomeadamente os materiais utilizados, o processo construtivo e a idade. Assim, a sensibilidade à penetração dos cloretos de um betão depende essencialmente da relação água/cimento, do tipo e quantidade de cimento, dos adjuvantes utilizados e do processo de cura.

A relação A/C tem um papel fundamental na definição da estrutura porosa do betão. Sendo a água necessária para a hidratação do cimento, o excesso desta conduz a um aumento da porosidade após a secagem do betão, enfraquecendo a ligação entre a pasta de cimento e os agregados. A utilização de uma baixa relação A/C permite a obtenção de um betão com reduzida porosidade e com os vasos capilares mais segmentados, limitando o ingresso de iões agressivos [63].

Betões produzidos com cimentos ricos em escórias de alto forno ou cinzas volantes tendem a apresentar menores porosidade e, consequentemente, maior resistência à penetração de cloreto [80]. No entanto, em ambientes muito poluídos, com elevadas concentrações de CO_2 e de iões cloretos, a utilização de cinzas volantes pode ter um efeito contraproducente, acelerando a penetração dos iões cloretos no betão [81].

O processo de cura do betão tem um papel importante na resistência à penetração de cloretos, não só pela disponibilidade de água para a hidratação do cimento, como também pela temperatura a que a cura se desenvolve. A cura de betões a temperaturas elevadas

promove uma precoce segmentação dos poros, conduzindo a uma menor porosidade inicial, mas a longo prazo os betões apresentam coeficientes de difusão de cloretos maiores [78].

A par com a constituição do betão, a agressividade do meio em que a estrutura está inserida tem um papel fundamental no ingresso dos cloretos. Os principais fatores ambientais a ter em consideração são a concentração de cloretos, as condições de humidade e de temperatura. O aumento do gradiente de cloretos conduz a um aumento da contaminação do betão. Por outro lado, níveis de humidade muito baixos tendem a bloquear o ingresso de cloretos. Valores de humidade entre 50 e 75% maximizam o ingresso de cloretos. A envolvente térmica da estrutura também influencia o processo de penetração de cloretos. Assim, quando os gradientes de temperatura e de concentração de cloretos estão orientados na mesma direção há um aumento do ingresso destes [82]. Quando se procede à medição dos cloretos no betão o valor obtido corresponde aos cloretos totais ou aparentes, que envolve os cloretos livres e os fixos ou ligados. No processo de difusão só os primeiros é que participam devido à liberdade de mobilidade que os caracteriza [83].

O modelo matemático utilizado para estimar o ingresso dos cloretos no betão, com base na 2ª lei de Fick, foi apresentado no *fib bulletin 34* [84] e depois adotado no *fib Model Code* de 2010 [85]. A adaptação deste modelo para a realidade portuguesa foi efetuada pelo LNEC, através da modelação do período de iniciação por ação dos cloretos proposto na especificação LNEC E-465, relativo à penetração por difusão [86], [87], cuja expressão base é a seguinte equação:

$$C(x, t) = C_s \left(1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \quad (9)$$

sendo:

$C(x, t)$ - concentração de cloretos em % da massa de ligante, função da profundidade x (m) e do tempo decorrido t (s);

C_s - concentração de cloretos em % de massa da massa de ligante à superfície do betão para $t=0$;

D - coeficiente de difusão dos cloretos no betão em m^2/s ;

erf - função erro, (ver Figura 17).

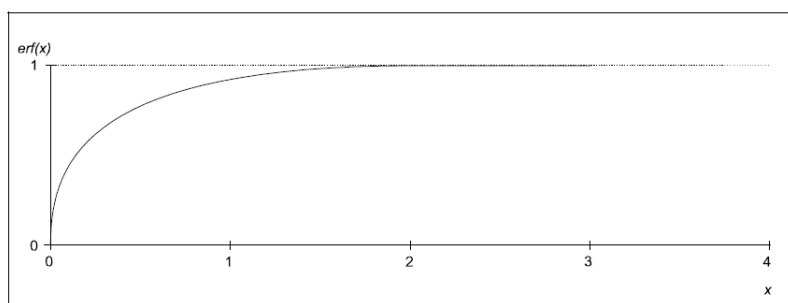


Figura 17 - Função erro $\operatorname{erf}(x)$.

A concentração de cloretos à superfície do betão, em percentagem de massa de cimento, pode ser determinada através da seguinte expressão:

$$C_s = C_b \times k_{a/c} \times k_{vert} \times k_{hor} \times k_{temp} \quad (10)$$

Em que:

C_b - teor em cloretos da água do mar, toma o valor 3,0% para as classes de exposição XS2 e XS3 e 2,0% para a classe XS1;

$k_{a/c}$ - função da relação água cimento - $k_{a/c} = 2,5 \times (A/C)$;

k_{vert} , k_{hor} - função do posicionamento da estrutura em relação a águas do mar na vertical e na horizontal;

k_{temp} - função da temperatura de exposição do betão.

O coeficiente de difusão, D , que varia com o tempo de exposição, pode ser obtido através da seguinte expressão:

$$D(t) = k_{D,c} \times k_{D,RH} \times k_{D,T} \times D_0 \times (t_0/t)^n \quad (11)$$

sendo:

$k_{D,c}$ - fator que tem em conta as condições de cura;

$k_{D,RH}$ - fator relativo à humidade relativa;

$k_{D,T}$ - fator que considera a influência da temperatura;

D_0 - coeficiente de difusão potencial determinado de acordo com a Especificação LNEC E-463;

n - fator que considera o decréscimo de D ao longo do tempo.

Um estudo desenvolvido pelo LNEC correlacionou o coeficiente de difusão potencial com a resistência à compressão de betões executados com diferentes tipos de cimento [76]. Neste enquadramento, e para betões executados com cimentos tipo CEM I e CEM II/A, o coeficiente de difusão potencial, D_0 , obtém-se através da seguinte equação:

$$D_0 = 8471,6 \times \sigma^{-1,5246} \quad (12)$$

sendo a tensão resistente média do betão à compressão, σ , que serve de base para estes cálculos, obtida pela soma da resistência característica do betão à compressão em cubos testados aos 28 dias de idade.

2.4.4. Ataque por sulfatos

O ataque por sulfatos enquadra-se, em geral, nos fenómenos de degradação química do betão, mas também pode ser enquadrado nos fenómenos de degradação física em condições específicas. Este ataque resulta da interação dos compostos cementícios com os sulfatos, produzindo reações químicas dentro do betão que conduzem à perda de resistência mecânica [88]. Trata-se de um complexo processo de interação físico-química, entre os iões sulfato e a pasta de cimento, cuja evolução depende de diversos fatores externos e internos. A própria origem dos sulfatos pode ser interna (ISA) ou externa (ESA) [89]. No primeiro caso este fenómeno pode ser controlado através da criteriosa seleção dos constituintes do betão, nomeadamente no que se refere aos agregados utilizados. No caso do ESA, este pode ser originado pelo contacto do betão com águas ou solos contaminados com sulfatos, água do mar ou águas residuais.

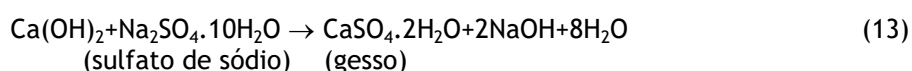
O ataque do betão por sulfatos classifica-se como fenómeno químico quando o processo físico-químico desencadeado pelos sulfatos tem como consequência o crescimento dos produtos da reação, etringite e gesso. Este fenómeno assume um cariz mais físico, designando-se desta forma, quando se produz a cristalização de sais no interior dos poros mais pequenos do betão, gerando pressões na solução supersaturada destes poros, conduzindo a uma expansão cuja consequência é o aumento de volume do betão [90].

Quando a origem do ataque por sulfatos é externa desencadeia-se um processo que envolve reações químicas, transporte iónico e degradação mecânica. Estes fatores interagem entre si, produzindo expansão e degradação do betão. A reação dos sulfatos com os compostos hidratados da pasta de cimento conduzem à formação de diferentes camadas, em diferentes estados de degradação [91].

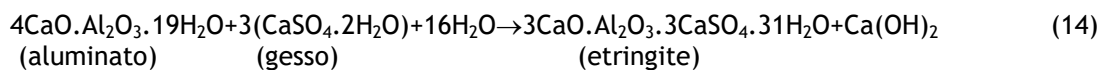
O ataque por sulfatos resulta da reação entre o ião sulfato com os aluminatos de cimento, formando-se sulfoaluminato tricálcico (etringite) e gesso. A presença de sílica e carbonato pode conduzir à formação de um terceiro composto a taumasite que foi identificada pela primeira vez por Erlin e Stark [92]. São, portanto, dois os fenómenos de degradação do betão associados ao ataque por sulfatos que interessa analisar, a formação da etringite e da taumasite.

A etringite pode resultar de dois processos químicos diferentes, um dos processos está associado aos sulfatos de cálcio e de sódio, e o outro associado ao sulfato de magnésio. O primeiro processo resulta da reação do sulfato de sódio com o hidróxido de cálcio formando sulfato de cálcio (gesso), seguida da reação deste com o aluminato de cálcio hidratado formando sulfoaluminato de cálcio (etringite), conforme indicado nas expressões seguintes.

Reação do sulfato de sódio com formação de gesso:

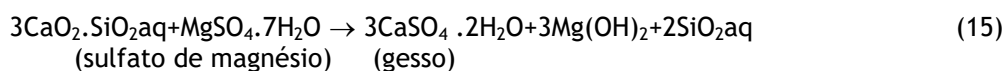


Reação do sulfato de cálcio com formação de etringite:

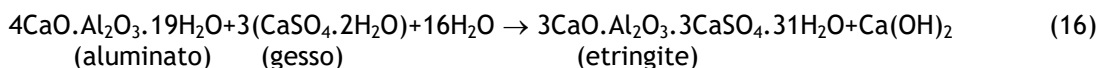


Um segundo processo de formação da etringite, que tem uma ação mais devastadora que o processo anterior, resulta da ação do sulfato de magnésio sobre os silicatos de cálcio hidratados e respetiva reação com os aluminatos e hidróxidos de cálcio, conforme apresentado das expressões seguintes.

Reação do sulfato de magnésio com formação de gesso:



Reação do sulfato de cálcio com formação de etringite:



De referir que a formação de etringite é elevada para temperaturas baixas (0°C) e reduzida ou nula para temperaturas altas (80°C), pelo que é uma reação lenta em países quentes. O modo de garantir a proteção do betão contra o ataque de sulfatos passa pela escolha do tipo de cimento (cimentos não reativos aos sulfatos) e pelo nível de porosidade do betão (razão A/C baixa). A expansão da etringite, segundo Wolfram Mullauer [93], pode ser dividida em três fases:

- fase 1 - formação da etringite por difusão que aumenta a pressão de cristalização nos poros pequenos. Nesta, fase o volume de expansão é pequeno assim como o dano;
- fase 2 - quando a pressão de cristalização excede a resistência de tração da matriz cimentícia a expansão é rápida e desenvolve fendilhação microscópica;
- fase 3 - a expansão atinge o volume máximo devido à inexistência de alumínio para novas reações.

A taumasite resulta da reação dos sulfatos com os silicatos cálcicos hidratados (C-S-H), que são o principal agente de ligação do cimento Portland. Esta reação é acompanhada por perda de resistência do betão, transformando o ligante numa pasta sem coesão [94]. Para ocorrer esta reação é necessário a existência de iões sulfatos, iões carbonato (em geral calcário presente no betão), silicatos cálcicos hidratados ou não hidratados e humidade ou água. O valor de pH também tem influência na formação da taumasite, esta só se forma quando o valor de pH é superior a 10,5. Acima deste nível o aumento do pH conduz ao aumento do volume de taumasite [94].

A decomposição dos silicatos cálcicos hidratados assume a seguinte forma:



A principal consequência deste processo é a descalcificação do C-S-H, com alteração da estrutura cimentícia por perda do ligante, com a consequente perda de resistência.

Dos diversos fatores que influenciam a eficácia do ataque por sulfatos ao betão, podem identificar-se como preponderantes as condições de exposição, a permeabilidade do betão e a composição deste. No primeiro conjunto de fatores, as condições de exposição, são relevantes o tipo e a quantidade de sulfatos, a temperatura e a humidade. A permeabilidade do betão afeta o seu desempenho face à ação dos sulfatos em função da dimensão e continuidade da sua estrutura porosa. O último dos fatores, a composição do betão, está relacionado com o tipo de cimento, as adições e a relação A/C [95]. Dos diversos fatores apresentados pode destacar-se:

- humidade, cujo aumento contribui para o incremento dos danos no betão;

- tipo de cimento, que quando constituído por cinzas volantes apresenta um acréscimo de resistência aos sulfatos;
- relação A/C, cuja redução contribui para a redução da difusidade dos sulfatos e consequente melhoria do comportamento do betão face aos mesmos [96].

2.4.5. Reações expansivas internas

As reações expansivas internas manifestam-se através do aparecimento de fissuração superficial, com forma irregular do tipo teia de aranha. Estas podem ter origem nas reações álcalis-agregado (RAA) ou nas reações sulfáticas de origem internas (RSI) [97].

Apesar das RAA serem reações com caráter destrutivo, na maior parte dos casos o seu impacto é mais estético que estrutural. As RAA podem dividir-se em duas subcategorias:

- Reações álcalis-sílica (RAS);
- Reações álcalis-carbonato.

As RAS, que usualmente englobam também as reações álcalis-silicato, são as mais importantes das reações expansivas internas. Para ocorrerem é necessário que o betão disponha de álcalis em quantidade suficiente, sílica reativa e que exista disponibilidade de água. Deste modo, é possível o desenvolvimento de uma sequência de reações química que envolve a sílica e os iões hidroxila, formando um gel sílico-alcálico. Este processo termina com a reação deste composto com o cálcio presente no betão formando silicatos de cálcio hidratados [98].

Em termos químicos as RAS resultam da reação entre o ião hidroxila (OH^-), os iões alcalinos presentes nos poros da pasta de cimento (Na^+ e K^+) e minerais de sílica presentes em certos agregados. Deste processo resulta um produto higroscópico, amorfo ou cristalino, designado por álcali-sílica gel. A expansão do gel resulta do processo de hidratação que envolve os iões Na^+ , K^+ , Ca^{2+} e a água presentes na solução dos poros [99]. A hidratação do gel conduz ao aumento do seu volume com o consequente aumento de tensões na interface cimento-agregado. Como a difusão dos reagentes e dos produtos da reação é limitada pela rede de poros na envolvente do agregado reativo é na envolvente deste que este processo se desenvolve [100].

Quando as tensões desenvolvidas na interface cimento-agregado atingem valores superiores à resistência à tração ocorrem fissuras que tem efeitos negativos nas propriedades do betão, nomeadamente conduzem à redução do seu módulo de elasticidade, consequência das fissuras, e redução da capacidade resistente à compressão, podendo afetar a sua durabilidade [101].

2.4.6. Corrosão das armaduras

A corrosão das armaduras é consequência do processo de degradação do betão, na medida em que este deixa de exercer a sua função protetora. Sem proteção o ferro tende a reagir com o meio envolvente procurando novos equilíbrios eletroquímicos, ou seja, estados mais estáveis que correspondentes a níveis de energia eletroquímica mais baixos. No caso específico do ferro das armaduras este fenómeno desenvolve-se no sentido da formação de óxidos e hidróxidos de ferro, sendo este processo designado por corrosão das armaduras.

A corrosão do ferro resulta da sua tendência natural para alcançar um estado de equilíbrio eletroquímico, estando este processo inibido de se desenvolver enquanto as armaduras estão inseridas em elementos de betão não degradados, devido ao efeito protetor que este material confere. Quando o betão deixa de exercer esta função protetora, permitindo o acesso do oxigénio, o ferro fica exposto ao desenvolvimento dos fenómenos de corrosão. A corrosão do aço é um processo eletroquímico que se desenvolve da superfície para o interior do material e que se caracteriza pelo desenvolvimento de duas zonas interdependentes, o ânodo e o cátodo, na presença de água. No ânodo ocorre o processo de oxidação do ferro com libertação de eletrões e formação de iões ferrosos (Fe^{2+}) e férricos (Fe^{3+}) que se movem no betão envolvente [102]. A expressão seguinte traduz o fenómeno de oxidação.



Os eletrões libertados fluem ao longo da armadura em direção aos cátodos, onde se combinam com o oxigénio e a água presentes no betão. No cátodo desenvolvem-se um processo de redução com libertação de iões hidroxilo, de acordo com a seguinte expressão:



Para se manter a neutralidade elétrica deste processo, os iões ferrosos deslocam-se através da água existente nos poros para as zonas catódicas, onde se combinam com os iões hidroxilo. Desta combinação resulta a formação de hidróxido de ferro, ou seja, ferrugem [103], conforme a expressão:



Na Figura 18 mostra-se uma representação esquemática dos fluxos de eletrões e de iões que resultam do processo de corrosão das armaduras.

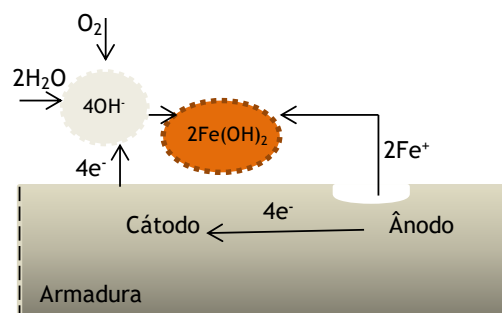


Figura 18 - Esquema do fluxo de elétrons e de íons durante o processo de corrosão da armadura.

Na Figura 19 apresentam-se os principais produtos da corrosão e o respectivo aumento de volume durante este processo.

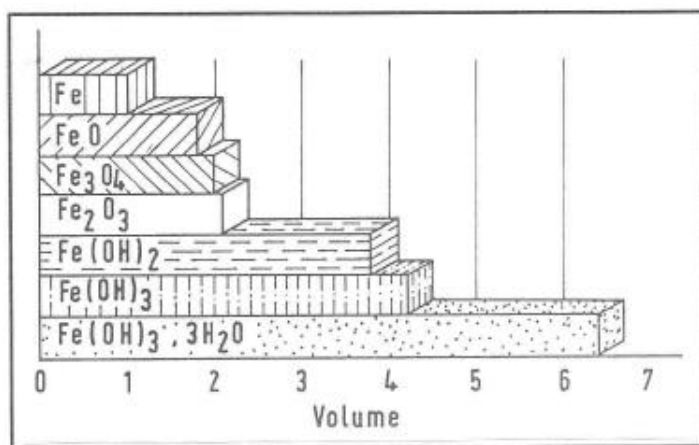


Figura 19 - Volume relativo dos produtos da corrosão [75].

O diagrama de Pourbaix, apresentado na Figura 20 mostra a suscetibilidade do ferro à corrosão em função do potencial e do pH da envolvente. Analisando o diagrama pode observar-se que está dividido em três zona principais:

- Zona 1 - o ferro encontra-se em condições favoráveis, em termos de potencial e de pH, ao desenvolvimento do processo de corrosão;
- Zona 2 - representa condições necessárias à passivação do ferro, resultado da criação de uma camada de ferrugem contínua que lhe confere estabilidade;
- Zona 3 - o ferro está imune à corrosão devido ao baixo potencial a que está sujeito. É nesta gama de valores que os sistemas de proteção catódica atuam.

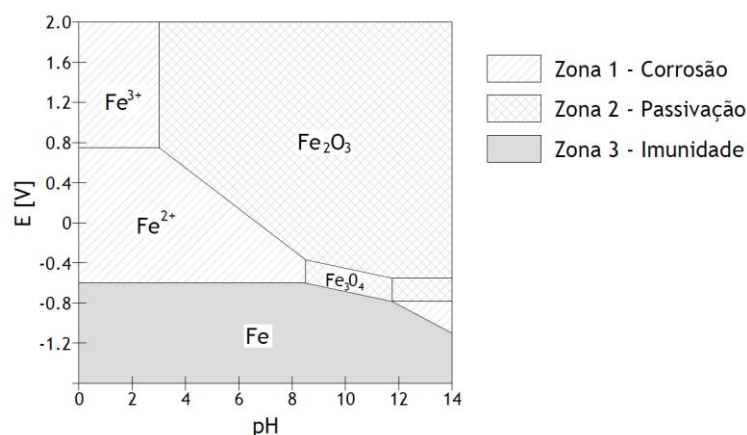


Figura 20 - Diagrama de Pourbaix simplificado.

A formação da camada passiva sobre a armadura ocorre após a hidratação da pasta de cimento, quando o pH da água contida nos poros do betão começa a subir. A estabilidade deste filme passivo depende da existência de níveis de pH superiores a 9 e de baixas concentrações de cloretos [104].

2.5. Tempo de vida útil de uma estrutura

A durabilidade das estruturas de betão armado está condicionada por diversos fatores que vão desde a forma como esta é concebida e executada, ao tipo de utilização e exposição ambiental a que esta sujeita durante a sua vida útil. Os principais mecanismos que condicionam a durabilidade e integridade estrutural, promovendo a sua degradação, são a carbonatação, a penetração dos cloretos e o ataque por sulfatos. A ação destes agentes da degradação está dependente do seu ingresso no interior do betão, fator que está correlacionado com a porosidade e a estrutura de poros capilares do material.

Segundo o Eurocódigo 2 [36], entende-se que uma estrutura duradoura é aquela que, durante a sua vida, satisfaz os requisitos de utilização, resistência e estabilidade, sem recurso excessivo a trabalhos de reparação e/ou manutenção não prevista. Em termos globais a durabilidade de uma estrutura depende do cálculo estrutural, dos materiais utilizados, do modo de execução e do processo de cura do betão. São estes quatro fatores que determinam a maior ou menor propensão da estrutura para resistir às diferentes ações a que vai estar exposta durante a sua vida útil.

A norma NP EN 206-1 define o conceito de vida útil de uma estrutura como o "período de tempo durante o qual o desempenho do betão na estrutura se mantém a um nível compatível com a satisfação dos requisitos de desempenho da estrutura, desde que haja adequada manutenção" [37]. Na norma NP EN 1990 o tempo de vida útil de projeto está definido como sendo o "Período durante o qual se pretende que uma estrutura ou parte da mesma seja utilizada para as funções a que se destina, com a manutenção prevista mas sem necessidade

de grandes reparações" [105]. Esta norma define também os valores indicativos para o tempo de vida útil a considerar em fase de projeto conforme indicado na Tabela 5.

Tabela 5 - Valores indicativos do tempo de vida útil de projeto [105].

Vida útil das obras		Exemplos
Categoria	Anos	
1	10	Estruturas temporárias
2	10 a 25	Partes estruturais substituíveis, p. ex., apoios
3	15 a 30	Estruturas para a agricultura e semelhantes
4	50	Edifícios e outras estruturas comuns
5	100	Edifícios monumentais, pontes e outras estruturas de engenharia civil

Para se garantirem os objetivos de durabilidade estabelecidos nas normas é necessário que as decisões tomadas na fase de conceção e projeto da estrutura sejam adequadas ao fim pretendido. Nesta etapa inicial do processo de implementação de uma estrutura são definidos um conjunto de condições e pressupostos que determinam a maior ou menor probabilidade de se alcançar a vida útil pretendida para a estrutura, pois servem de suporte à sua execução e utilização. Na Figura 21 esquematizam-se os fatores envolvidos na durabilidade e no desempenho do betão armado.

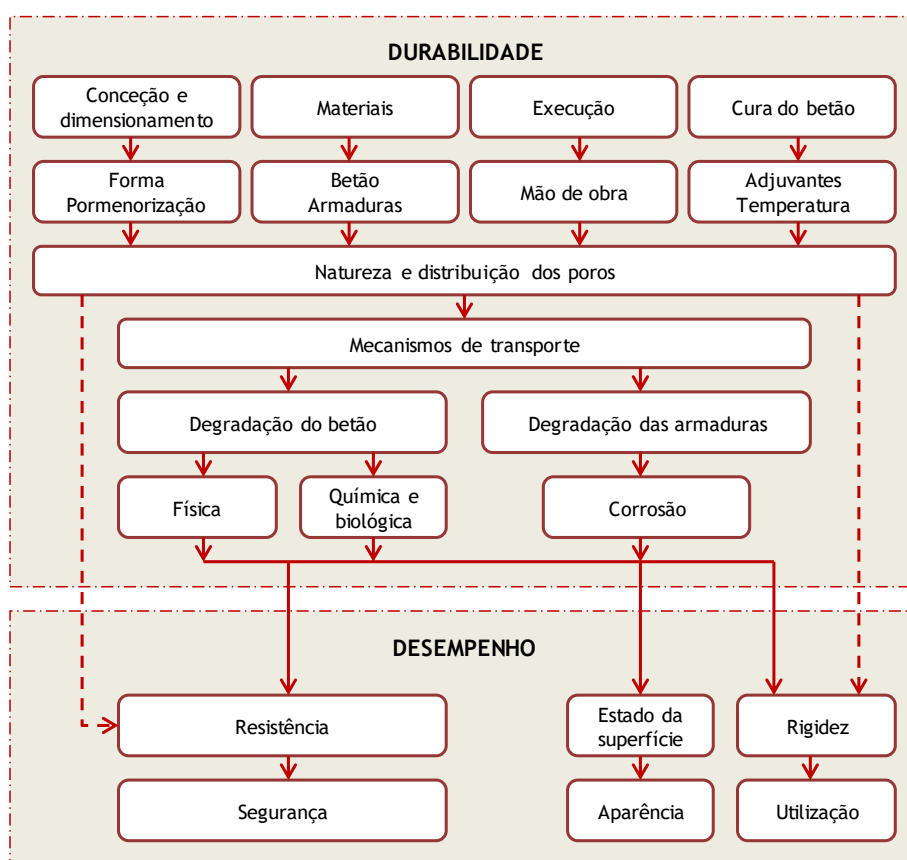


Figura 21 - Relação entre os fatores que determinam a durabilidade e o desempenho do betão, adaptado de [62].

2.5.1. Conceção e dimensionamento

A conceção começa com a análise do projeto de Arquitetura e o local de implantação da obra. Nesta fase são definidos os primeiros fatores que condicionam a vida útil da estrutura, nomeadamente a sua exposição ambiental, meio envolvente e nível de proteção das armaduras. A definição da classe de exposição ambiental e o nível de proteção da estrutura em relação ao ambiente exterior são os fatores chave para a elaboração do projeto, designadamente pela sua influência na escolha do tipo de betão, na determinação da camada de recobrimento das armaduras e, eventualmente, na escolha do tipo de armadura a adotar.

A classe de exposição ambiental é definida em função do tipo e intensidade da ação dos agentes da degradação a que o betão estará sujeito (carbonatação, ataque por cloretos, ataque por sulfatos, etc.), conduzindo o seu incorreto enquadramento a custos desnecessário, no caso da opção por exposições ambientais mais gravosas que as reais, ou à redução da vida útil pretendida, no caso contrário. A segunda situação é muito frequente, sendo a razão pela qual muitas estruturas apresentam níveis elevados de deterioração precoce. Importa, pois, sublinhar a necessidade de se efetuar o devido enquadramento ambiental da estrutura logo na fase inicial da conceção.

Ainda na fase de conceção da estrutura é fundamental garantir a correta definição das ações atuantes, pois são as solicitações a que a estrutura estará sujeita que determinam a sua resposta, em termos tensões, esforços, deformações, condicionando a sua adequação ao objetivo da construção. A incorreta definição de ações conduzirá a um desadequado dimensionamento da estrutura tendo consequências não só ao nível do seu comportamento aos estados limite últimos (resistência) como aos estados limite de utilização, designadamente no que se refere aos limites da deformação e da fendilhação, sendo este último um fator chave para a proteção das armaduras em relação à penetração dos agentes agressivos.

Na fase de dimensionamento das estruturas de betão armado são utilizados modelos e métodos de cálculo que determinam a escolha das secções de betão e as áreas de armadura. A forma dos elementos de betão podem favorecer ou limitar a ação dos agentes externos, por exemplo a criação de zonas exposta de difícil acesso e com deficiente drenagem, que não permitam uma limpeza e manutenção adequadas pode facilitar a acumulação de detritos. Por outro lado, a escolha de soluções com menores áreas expostas conduz a um melhor comportamento face à ação de agentes exteriores.

Do dimensionamento de uma estrutura de betão armado resulta um conjunto de peças escritas e desenhadas que servem de suporte à fase de execução, sendo estas últimas utilizadas pelos operários para implementar a estrutura. Assim, o rigor adotado na sua elaboração, será determinante para garantir a correta materialização do projeto. A pormenorização das soluções de forma clara e a uniformização dos processos contribuem para limitar os erros de execução, ao invés, as pormenorizações incompletas ou muito elaboradas

com muitas variáveis e as soluções de elevada complexidade incrementam a probabilidade de erros na execução dos trabalhos.

2.5.2. Materiais

Em termos de materiais, a seleção adequada dos constituintes do betão é o principal fator que determina a durabilidade das estruturas. A composição do betão conduz a uma maior ou menor porosidade e, conseqüentemente, a capacidade que este tem para fazer face à ação dos agentes externos. São fatores determinantes, em termos de durabilidade, a dosagem de cimento e a relação água/cimento, mas também a compacidade da composição granulométrica.

Quanto maior for a compacidade da mistura dos agregados menor será o volume de vazios entre partículas, reduzindo o volume de pasta de cimento necessária para colmatar os vazios. A utilização de misturas relativamente pobres em areias permite obter compacidades elevadas e limitar a necessidade de água de amassadura [106].

Uma maior dosagem de cimento, assim como uma relação A/C baixa, contribui para a redução da porosidade do betão. A água em excesso, mais que a necessária para se estabelecerem as ligações químicas da pasta de cimento, irá evaporar deixando vazios no betão, que poderão ser utilizados para a penetração dos agentes agressivos.

2.5.3. Execução

Durante a execução das estruturas são muitos os fatores a ter em consideração dada a complexidade do processo e a existência de inúmeros intervenientes. Nesta fase, a garantia de qualidade da obra depende do eficaz controlo dos processos de execução, dos materiais utilizados e do cumprimento das especificações de projeto. Este processo envolve a execução da cofragem, montagem da armadura e colocação do betão. São três etapas sequenciais e interdependentes que determinam o resultado final.

A cofragem serve para definir a forma da peça, a sua textura, suportar o betão fresco até ao seu endurecimento com deformações reduzidas e garantir a estanquidade de modo a evitar a perda de água. Para evitar defeitos superficiais é importante que as cofragens sejam fáceis de desmoldar, utilizando-se óleo descofrante para limitar a aderência entre o betão e a cofragem. Alguns dos defeitos das estruturas estão associados a deslocamentos das cofragens, dos prumos que as sustentam ou da sua precoce remoção. A maior ou menor uniformidade da superfície do betão depende das características da cofragem utilizada. Os tipos de cofragens mais utilizados são as pranchas de madeira ou contraplacado marítimo e as chapas metálicas.

O betão, em princípio produzido numa central, tem que ser transportado para a obra onde será colocado. Este processo envolve três níveis de incerteza, sendo o primeiro a qualidade do betão produzido, que pode ser controlada através de ensaios, o segundo o impacto do transporte do betão para a obra e a garantia que chega com as características especificadas em projeto, por fim a sua colocação e compactação de forma evitar a segregação dos agregados e reduzir o ar no interior do betão.

A compactação, em geral efetuada por vibração, tem como função permitir a organização dos constituintes do betão (agregados e pasta de cimento) de forma a garantir o preenchimento dos moldes, envolver adequadamente as armaduras e reduzir os espaços vazios. Deste modo consegue-se um betão mais denso, com melhor distribuição dos seus constituintes e com menor porosidade, logo mecanicamente mais resistente, mais durável e com melhor aparência [107].

2.5.4. Cura do betão

Após a moldagem inicia-se a cura do betão, que corresponde ao período de tempo que é necessário para se estabelecem as ligações entre os diferentes componentes do cimento, processo que carece da presença de água nas quantidades adequadas. O endurecimento do betão, acompanhado pelo aumento da sua resistência, é fortemente influenciado pelas condições ambientais, tais como a humidade, a temperatura, a velocidade dos ventos, etc. Para se garantir que o processo de cura decorre sem problemas é preciso evitar a carência de água que pode ocorrer por evaporação excessiva. São diversas as estratégias que podem ser usadas para garantir a adequada hidratação do betão, nomeadamente a imersão das peças, a molhagem contínua ou manter as peças cobertas com plásticos de forma a reter a humidade. Um correto processo de cura minimiza a retração plástica e assegura a resistência e durabilidade das camadas superficiais do betão. A NP EN 13670 prevê quatro classes de cura para o betão, função das classes de exposição ambiental, cujos critérios de proteção variam entre 12h para betões sem riscos de corrosão (classe 1) até ao tempo necessário para se alcançar 70% da resistência característica à compressão aos 28 dias para a classe 4 [38].

Em resumo, são múltiplos os fatores que interferem na durabilidade das estruturas de betão, pelo que é fundamental o controlo de todo o processo de modo a garantir um produto final adequado aos objetivos estabelecidos para a construção.

2.5.5. Vida útil das estruturas de betão armado

O conceito de vida útil foi desenvolvido por Tuutti [2], e parte da definição do nível de degradação admissível de modo a determinar o limite aceitável para a vida da estrutura, ou

seja, a vida útil, momento a partir do qual a estrutura já não desempenha as funções para as quais foi concebida de acordo com os requisitos de segurança definidos.

O conceito de vida útil de uma estrutura de betão armado engloba duas fases designadas por período de iniciação e período de propagação. O período de iniciação corresponde à penetração dos agentes da degradação do betão na camada de recobrimento até à envolvente das armaduras, criando as condições necessárias à sua despassivação, ou seja, à remoção da película passiva que protege o aço da corrosão. A destruição desta película pode ocorrer por efeitos da carbonatação, que conduz à redução do pH do betão envolvente à armadura para valores inferiores a 9, ou por concentração de cloretos acima de um determinado valor designado por teor crítico de cloretos. A fase da propagação é o período de tempo que medeia entre a despassivação das armaduras, que pode ser generalizada ou pontual em função do agente da degradação, e o limite de durabilidade estabelecido, que pode ser definido em função da perda de secção da armadura, associado a um determinado grau de corrosão das armaduras e degradação do betão.

O processo de corrosão das armaduras pode, segundo Liu et al., ser dividido em três fases. Na primeira fase os produtos da corrosão ocupam os espaços vazios existentes em torno da armadura. Em continuação, o acréscimo de volume da ferrugem começa a desenvolver tensões sobre o betão envolvente da armadura. Por fim, quando as tensões geradas pela ferrugem são superiores à tensão resistente do betão à tração inicia-se o processo de fissuração em torno da armadura [108].

Este tipo de abordagem pode ser efetuada com recurso a modelos de desempenho como o proposto pela especificação E 465 do LNEC [72], que define uma metodologia para estimar as propriedades de desempenho do betão em função da exposição ambiental (ação do dióxido de carbono ou dos cloretos da água do mar) para uma vida útil de projeto. Na Figura 22 mostra-se o modelo de Tuutti para a degradação do betão.



Figura 22 - Modelo de Tuutti para a degradação do betão armado, adaptado de [2].

A definição das metodologias a adotar para determinar a vida útil das estruturas de betão armado é um dos temas mais complexos em engenharia de estruturas. Se por um lado, no cálculo estrutural existe um grau de confiança elevado em relação aos resultados, por outro, quando se pretende definir a vida útil das estruturas de betão armado são muitas as incertezas que se colocam, devido à complexidade e interdependência dos fatores envolvidos na sua determinação, nomeadamente no que se refere à composição do betão, transporte e colocação em obra, processo de cura e exposição ambiental. Também o tipo e o diâmetro das armaduras utilizadas influencia o resultado final, em termos de vida útil.

Para estimar a vida útil de uma estrutura de betão armado são geralmente utilizadas duas abordagens distintas, ou através da definição de requisitos a adotar para obter uma determinada vida útil, métodos prescritivos (determinísticos), ou pelo estudo dos fatores que conduzirão a um determinado estado limite de degradação da estrutura definido como aceitável, métodos baseados no desempenho (probabilísticos) [3] e [109].

A classificação dos modelos de cálculo da vida útil das estruturas pode ser efetuada subdividindo os modelos em três categorias, englobando a categoria 1 os modelos prescritivos ou por requisitos, a categoria 3 os modelos centrados no desempenho e a categoria 2 para os modelos intermédios. Na Tabela 6 apresenta-se a classificação proposta por C. Andrade [110] para os modelos de cálculo da vida útil.

Tabela 6 - Modelos para comprovar a durabilidade, adaptado de [110].

MODELOS PARA COMPROVAR A DURABILIDADE		
Categoria 1	Categoria 2	Categoria 3
Modelos determinísticos	Modelos semi-probabilísticos	Modelos probabilísticos
Tempo implícito		Tempo explícito
Códigos e Normas	Indicadores de durabilidade	Modelos de desempenho

A vida útil de uma estrutura também pode ser definida de uma forma prescritiva, com recurso a normas [37] e [39], que estabelecem as medidas a adotar de forma a obter um betão que satisfaça os requisitos de durabilidade para a vida útil pretendida em função das classes de exposição ambiental. Na Tabela 7 apresentam-se os limites para a composição do betão em função das classes de exposição ambiental, associadas à ação do dióxido de carbono e à ação dos cloretos da água do mar, para uma vida útil de 50 anos segundo a E 464 do LNEC.

Tabela 7 - Limites da composição e da classe de resistência do betão em função das classes de exposição para uma vida útil de 50 anos, adaptado de [39].

Tipo de cimento	CEM I e CEM II/A						
Classe de exposição	XC1	XC2	XC3	XC4	XS1	XS2	XS3
Mínimo recobrimento nominal (mm)	25	35	35	40	45	50	55
Máxima razão água/cimento	0,65	0,65	0,60	0,60	0,45	0,45	0,40
Mínima dosagem de cimento, C (kg/m ³)	240	240	280	280	360	360	380
Máxima classe de resistência	C25/30 LC25/28	C25/30 LC25/28	C30/37 LC30/33	C30/37 LC30/33	C40/50 LC40/44	C40/50 LC40/44	C50/60 LC50/55

A camada de recobrimento das armaduras é um elemento chave na longevidade das estruturas de betão armado. Esta camada corresponde ao betão que envolve pelo exterior as armaduras das estruturas de betão conferindo a necessária ligação aço-betão e a proteção das armaduras aos agentes exteriores, sem a qual a durabilidade das armaduras estaria comprometida. A NP EN 1992 define o recobrimento das armaduras como sendo "a distância entre a superfície da armadura (incluindo ganchos, cintas, estribos e armadura de pele, quando relevante) que fica mais próxima da superfície e esta última" [36].

Ao longo das últimas décadas muitos estudos tem sido efetuados com o intuito de avaliar a interação do betão com o meio envolvente, nomeadamente no que se refere às características da camada de recobrimento e o seu efeito na proteção das armaduras inseridas no betão [1], [61], [78], [111] e [112]. Mais recentemente, as normas europeias de estruturas [36], [37] e [105], vieram estabelecer critérios a adotar para a prescrição dos betões e espessuras da camada de recobrimento em função da exposição ambiental e da vida útil da estrutura preconizada no projeto.

O desempenho do betão de recobrimento das armaduras resulta de uma complexa interação de fatores, internos e externos [113], dos quais se podem destacar a sua constituição, nomeadamente no que se refere à quantidade e qualidade do ligante utilizado (cimento ou cimento e adições), a relação A/C e espessura da camada de recobrimento, e as condições de exposição ambiental, designadamente o tipo de agentes de degradação (carbono, cloretos, sulfatos, ...) e a forma como interagem com o betão [114] e [115].

O grau de proteção das armaduras conferido pelo recobrimento está dependente, para além da sua espessura, da capacidade que este apresenta para limitar a entrada de agentes exteriores agressivos, nomeadamente o carbono e os cloretos. Esta capacidade está relacionada com a porosidade do betão da camada de recobrimento e consequentemente com a sua permeabilidade [71].

O incremento da vida útil das estruturas pode ser conseguido com a proteção do betão através de pintura, através da utilização de tintas com base solvente e mais recentemente

com base aquosa [116]. Estas técnicas são de fácil aplicação e eficazes em termos de proteção do betão. Apesar de não protegerem as armaduras diretamente, as tintas que cumprem os requisitos da norma EN 1504-2 [53], por exercerem um efeito barreira contra a permeabilidade à água no estado líquido e de agentes da corrosão, mantendo um nível aceitável de permeabilidade ao vapor de água, protegem o betão contra o ingresso dos agentes da degradação. O LNEC definiu o valor limite de permeabilidade de tintas $10^{-14} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, quando se pretende garantir a proteção do betão ao ingresso de cloreto de sódio.

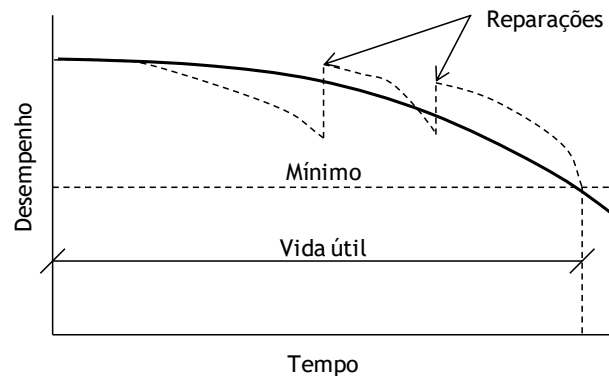


Figura 23 - Relação entre desempenho e vida útil de uma estrutura de betão armado, adaptado de [62].

Assim, a vida útil de uma estrutura depende de um conjunto de fatores intrínsecos ao processo de execução que lhe deu origem, mas também da exposição ambiental a que está sujeita e ao tipo e qualidade da manutenção que lhe é efetuada ao longo do tempo. Na Figura 23 apresenta-se de uma forma qualitativa a relação entre o tempo de duração de uma estrutura e o seu desempenho.

Capítulo III

Sistemas de monitorização da degradação para uma abordagem de manutenção BIM

Este capítulo consiste no seguinte capítulo de livro:

Degradation Monitoring systems for a BIM maintenance approach

Pedro Romano and Paulo Brito

Publicado no livro " Sustainable Construction and Building Materials", IntechOpen, 2018. DOI: 10.5772/intechopen.81433.

Resumo

A digitalização permite desenvolver sistemas tecnológicos inéditos com base na utilização de sensores, robótica e automação. A indústria da construção está envolvida neste processo integrador de novas tecnologias, através de uma plataforma designada por Building Information Modeling (BIM), que facilitará a gestão da crescente complexidade dos processos de construção.

Esta metodologia procura a criação de um sistema global interativo de partilha de informação entre os diferentes intervenientes no processo de construção. A integração dos processos cria oportunidades ao nível económico e ambiental, que se podem traduzir no aumento de eficiência do setor. A informação recolhida poderá ser utilizada ao longo do ciclo de vida da construção, que em conjunto com a monitorização dos edifícios permitirá suportar as decisões de manutenção.

A monitorização de estruturas de betão armado com sensores permite identificar e quantificar os processos de degradação, através do acompanhamento de diversos parâmetros característicos do betão armado ao longo do tempo, e determinar alterações significativas que indiquem a existência de um processo degradativo em desenvolvimento. A obtenção deste tipo de informações, e a sua integração em modelos BIM, permitirá intervir numa fase inicial de modo a limitar danos e custos associados à manutenção da estrutura, contribuindo para potenciar o aumento da vida útil desta.

Palavras Chave: *Betão, monitorização, BIM, manutenção, inovação na construção*

3.1. Introdução

A industrialização tem sido um processo dinâmico que se iniciou no fim do século XVIII através da mecanização dos processos de fabrico e que se estendeu até aos nossos dias, tendo sido a fase inicial deste processo designada por Revolução Industrial, por ter introduzido profundas alterações na sociedade da época. A industrialização envolveu progressos contínuos, mas também processos disruptivos tais como a eletrificação das fábricas no início do século XX, designada por 2º revolução industrial, ou a automação com recurso a meios eletrónicos e informáticos que se iniciou nos anos 1970 (3º revolução industrial) [117]. No presente estamos a atravessar a já designada 4ª revolução industrial também conhecida por digitalização, que se caracteriza pela utilização de sistemas físicos cibernéticos (CPS - *Cyber Physical Systems*), baseada em dados heterogêneos e integração de conhecimento [118], conforme se apresenta na Figura 24.

1ª revolução industrial	2ª revolução industrial	3ª revolução industrial	4ª revolução industrial
Fim do século 18	Início do século 20	Década de 1970	Hoje
Introdução da produção mecânica	Eletrificação industrial	Automação da produção	Sistemas de produção Cyber-físicos

Figura 24 - Esquema das diferentes fases da revolução Industrial.

Estes sistemas têm como objetivo responder de forma ágil aos requisitos de produção, que estão sujeitos a alterações frequentes, e à melhoria do desempenho da indústria em termos de eficácia e eficiência [119]. A digitalização vai permitir criar plataformas tecnológicas inéditas para sistemas de produtos de consumo, infraestruturas urbanas e ativos industriais, com base na utilização de sensores inteligentes, robótica e automação [120]. Este processo de evolução que a indústria vinha desenvolvendo e implementando foi formalizado pela Alemanha em 2013, com a apresentação do programa designado "Industry 4.0", que envolve dados digitais, acesso digital, automação e conectividade. Posteriormente outros países apresentaram as suas próprias estratégias de desenvolvimento industrial, os EUA com o "Projeto Industrial da Internet", a França com a estratégia da "Nova França Industrial", a Inglaterra com a "Estratégia Industrial Britânica de 2050", o Japão com a "Estratégia de Revitalização da Fabricação" e a China com a "Made in China 2025" [121].

Todas estas estratégias tendem a procurar acelerar a integração das novas tecnologias nas cadeias de produção de forma a melhorar globalmente o seu funcionamento. O modelo de fábrica inteligente, de acordo com o conceito Indústria 4.0, baseia-se na utilização generalizada de sistemas físicos cibernéticos, que permitem a integração vertical dos seus vários componentes para implementar um sistema de produção flexível e reconfigurável, portanto inteligente. Este tipo de fábrica, como qualquer outra fábrica, está equipada com objetos físicos (máquinas, transportadores e produtos), mas também com sistemas de automação e informação para implementar uma produção flexível e ágil. No conceito

Indústria 4.0 uma fábrica é constituída por quatro níveis de recursos, que são os recursos físicos, a rede industrial, a nuvem e os terminais de controle e de supervisão. Os primeiros são equipados com sistemas inteligentes que comunicam entre si através da rede industrial. A nuvem suporta o sistema de informação integrado, onde são recolhidos e tratados os dados obtidos ao nível dos recursos físicos e interage com os operadores através de terminais de controlo de supervisão [122]. As técnicas computacionais de tratamento de dados, usualmente designadas por *Big Data*, permitem processar grandes quantidades de informação, extraindo resultados úteis em função de um determinado objetivo [123].

Como todas as indústrias, também a da construção está envolvida neste processo integrador de novas tecnologias e de reformulação das redes de fornecimento [124]. No entanto, o setor da construção tem características específicas que, *a priori*, dificultam a sua adaptação a estas novas tecnologias. Entre estas singularidades está o facto de o processo de construção ser temporário, irrepetível (tanto em termos de conteúdo como de localização), faseado e envolvendo um grande número de intervenientes com diferentes níveis de especialização. Esta variabilidade e fragmentação constitui um desafio para a eficiente coordenação dos projetos, limita a possibilidade de aprender com a experiência, dificulta a implementação de processos de melhoria contínua pela repetição e impõe uma coordenação complexa da comunicação e troca de informações entre os intervenientes [125]. Este setor caracteriza-se também por possuir uma cultura muito forte e rígida, que apresenta pouca abertura à mudança [22]. Uma obra de construção pode ser analisada, em termos físicos, pelo conjunto de etapas ou processos que decorrem fora do local da obra, antes desta se iniciar e durante a sua execução, e as atividades que decorrem no local da obra, durante a execução desta e posteriormente durante a fase de utilização da construção.

Para enquadrar todas as fases de um processo de construção, que envolve as atividades que decorrem antes, durante e após a construção, que estão naturalmente ligadas, mas que, quando procuramos melhorar a eficácia e eficiência global do sistema, carecem de um fio condutor que mostre todo o processo de uma forma clara, a generalidade dos estudos sobre a "Indústria 4.0" considera a metodologia BIM como a tecnologia base para a digitalização do setor da construção, por permitir a simulação e a modelação das construções, o que facilita a gestão da crescente complexidade dos processos de construção. Por outro lado, esta tecnologia permitirá no futuro a integração de toda a informação produzida desde a fase de projeto até ao fim da vida da construção [118].

3.2. Modelação Informática de Edifícios (BIM - Building Information Modeling)

A metodologia BIM centra-se na criação de um sistema global interativo de partilha de informação entre os diferentes intervenientes no processo de construção [126]. Esta

metodologia permite desenvolver sinergias nas diversas fases deste processo, em especial na fase de construção, mas também na fase de projeto quando é necessário decidir questões críticas. A integração de todo o processo cria importantes oportunidades para a redução dos impactos económicos e ambientais e, no futuro, poderá produzir incrementos significativos de eficiência na indústria da construção, que é considerada uma das indústrias menos eficientes [127]. Com esta metodologia pretende-se obter uma visão global dos edifícios (e infraestruturas), criando uma base de informação que poderá ser utilizada ao longo do seu ciclo de vida, mas que impõe alterações na forma como estes são concebidos, construídos e geridos.

A metodologia BIM baseia-se na utilização de uma infraestrutura de banco de dados para incorporar a informação sobre uma determinada construção de acordo com o interesse específico dos intervenientes no processo, tendo como suporte a modelação 3D do edifício. Integra descrições digitais de todos os objetos da construção e as interligações entre os diferentes objetos, para que os interessados possam consultar a informação, simular o comportamento e estimar as atividades e os processos de construção numa lógica de estudo do ciclo de vida [22]. Numa primeira fase esta metodologia permite desenvolver os projetos de uma forma mais interativa entre as diferentes especialidades, facilitando a identificação de incompatibilidades de projeto numa fase inicial. Permite centralizar a informação de modo a otimizar a preparação da obra, tanto ao nível das medições e orçamentação, como na elaboração do planeamento da obra.

Na fase de obra a utilização da modelação 3D permite visualizar, tanto a 2D como a 3D, os trabalhos a desenvolver, facilitando a sua compreensão e simplificando a execução destes. Um estudo publicado por Hosseini et al. mostra que o interesse pela investigação sobre a construção fora do local da obra tem aumentado nos últimos anos, focando-se essencialmente na área das Operações e Gestão [128]. Neste contexto pode destacar-se a utilização da metodologia LEAN como ferramenta de gestão, por promover a redução do desperdício na cadeia de produção. Esta metodologia foca-se na identificação dos produtos e serviços que têm valor para os clientes, com o objetivo de eliminar as partes que não são valorizadas, classificadas como desperdício. É um processo que envolve a definição da cadeia de valor do produto, promover o fluxo contínuo do produto/serviço pela cadeia de valor (reduzindo os tempos de produção e removendo obstáculos), procurar produzir exclusivamente o que os clientes querem (reduzindo *stock*) e promove um processo de melhoria continua, procurando reduzir o tempo dos ciclos de produção e obter a melhor relação entre a qualidade e a quantidade, sempre centrado no interesse do cliente [127].

Após a conclusão da obra a informação produzida fica disponível para o dono de obra. Deste modo o processo de manutenção e monitorização dos edifícios fica suportado numa base sólida, que permite suportar as decisões conducentes a intervenções. Esta informação pode incluir desde fichas técnicas de produtos a manuais de equipamentos de modo a permitir aos

técnicos de manutenção o acesso aos dados específicos dos equipamentos para as suas intervenções. Para que os processos de manutenção sejam consistentes é importante que se proceda também à monitorização dos edifícios, em termos estruturais e ambientais, de forma a recolher informação, ao longo do tempo, que suportará as decisões de manutenção e, eventualmente, de fim de vida.

Como a implementação da modelação da informação dos edifícios contribuirá para a produção massiva de novos dados informáticos relativos às construções, que terão de ser necessariamente tratados por possuírem valor intrínseco para o desempenho do setor, será necessária a utilização de técnicas computacionais para tratamento de dados, tipo *Big Data*, que tem aplicações para quase todas as atividades industriais, incluindo a indústria da construção. Atualmente, nesta indústria já se trabalha com grandes volumes de dados heterogêneos, que tendem a aumentar de forma exponencial à medida em que se introduzem novos sistemas, que incluem as redes de sensores para captação de dados, que tendem a aumentar a comodidade dos utilizadores [123].

3.3. Ferramentas de gestão e manutenção

A manutenção de um edifício deve ser efetuada com recurso a ferramentas que permitam a definição e implementação de diretrizes claras para se poderem desenvolver as ações de manutenção necessárias. Esta atividade pode ocorrer de três formas distintas, mas complementares, designadas por manutenção preventiva, corretiva e preditiva, dependendo para a sua operacionalização de um conjunto de elementos, designadamente:

- planos de ações de manutenção preventiva;
- emissão de ordens de trabalho;
- registo de ocorrências e falhas;
- registo das ações efetuadas para uso em diagnóstico de falhas;
- descrição de como as falhas foram identificadas;
- registo das eventuais causas (capacidade preditiva);
- recursos disponibilizados e utilizados;
- recolha de informação relevante (apoio a ocorrências futuras).

A manutenção preventiva ocorre de modo planeado, de forma sistemática com intervalos de tempo definidos, ou de forma condicionada, em função de determinadas condições previamente definidas. O planeamento das intervenções é suportado no conhecimento prévio das características de durabilidade dos materiais e nas especificidades dos equipamentos existentes no edifício. Procura-se evitar o aparecimento de problemas e, deste modo, limitar as consequências que resultam da normal deterioração dos materiais. A manutenção preventiva reduz custos de exploração, aumenta a vida útil dos edifícios e é um garante da segurança dos utilizadores.

A manutenção corretiva é a reação a uma determinada ocorrência, que pode ter caráter urgente ou não, cujo objetivo é restabelecer as condições de normal utilização do edifício. Este tipo de manutenção pode envolver custos elevados, tanto ao nível dos materiais como da mão de obra que é necessário mobilizar, e custos associados à descontinuidade da utilização corrente do edifício.

O terceiro tipo de manutenção é a manutenção preditiva e resulta da análise das informações recolhidas através da monitorização do edifício e das inspeções efetuadas. A manutenção preditiva permite antecipar a necessidade de serviços de manutenção para um determinado componente do edifício, contribuindo para:

- reduzir trabalhos de manutenção corretiva;
- impedir a multiplicação dos danos;
- limitar o impacto das intervenções na utilização do equipamento;
- prolongar a utilização dos diferentes componentes da construção;
- mitigar o impacto das inspeções;
- aumentar o tempo de utilização do edifício sem constrangimentos;
- elevar o grau de confiança no desempenho do edifício.

Para o desenvolvimento de modelos de manutenção preditiva em edifícios, é preciso recorrer a sistemas de medição de indicadores relevantes, de modo mais ou menos contínuo no tempo. Através da utilização da metodologia BIM é possível integrar estes indicadores num único sistema de informação sobre o estado da construção ao longo do tempo e, em simultâneo, ter acesso à informação de base, tal como as características dos materiais utilizados na construção. Assim, consegue-se articular a informação recolhida com a informação pré-existente no modelo 3D do edifício. Deste modo, é possível fazer uma análise rápida e eficaz da evolução do estado do edifício [129]. Estão em desenvolvimentos ferramentas que ligam a gestão da manutenção aos modelos BIM. Com esta ligação pretende-se facilitar a integração de dados recolhidos para a gestão da manutenção nos modelos BIM, de forma a autonomizar, através de algoritmos, a produção de ordens de serviço de manutenção [130].

No caso específico da manutenção de estrutura de betão armado são vários os indicadores que permitem medir o seu desempenho e que podem ser utilizados para aferir o estado de conservação e determinar a necessidade de proceder a intervenções de manutenção preditivas.

Estes indicadores têm como objetivo identificar e quantificar os processos de degradação a que o betão armado está sujeito, medindo a sua variação ao longo do tempo, de modo a determinar, numa fase inicial, alterações significativas que indiquem a existência de um processo de degradação em desenvolvimento. A obtenção deste tipo de informações permite intervir numa fase inicial de modo limitar danos e custos associados à manutenção da estrutura, contribuindo para potenciar o aumento da vida útil desta e dar informações relevantes para incrementar a durabilidade de novas estruturas.

Em geral, os métodos de ensaio classificam-se em destrutivos e não destrutivos. Os primeiros métodos podem recorrer a ensaios laboratoriais, mas dificilmente poderão ser utilizados de forma sistemática em estruturas em funcionamento. Os métodos de ensaio não destrutivos, ou menos intrusivos, são mais interessantes por permitirem acompanhar a evolução dos fenómenos de degradação das estruturas.

Os primeiros sensores para a monitorização do betão armado apareceram na década de 90, entre estes podem destacar-se os sensores constituídos por dois eléctrodos, um de aço preto (ânodo) e outro de um metal nobre (cátodo), embebidos no betão que confere protecção contra a corrosão do ânodo e, através dos quais, se podia medir a passagem da corrente elétrica, conforme se mostra na Figura 25. Estes sensores baseiam-se no princípio de que numa fase inicial, enquanto o betão apresenta um pH elevado, a passagem de corrente elétrica é negligenciável ou nula e, numa fase posterior, seja por efeito da frente de carbonatação ou da penetração de cloretos, o pH do betão baixa criando condições para a corrosão do ânodo e, em simultâneo, para a passagem de corrente elétrica entre os eléctrodos, que aumentará com o desenrolar do processo de corrosão do aço [131].

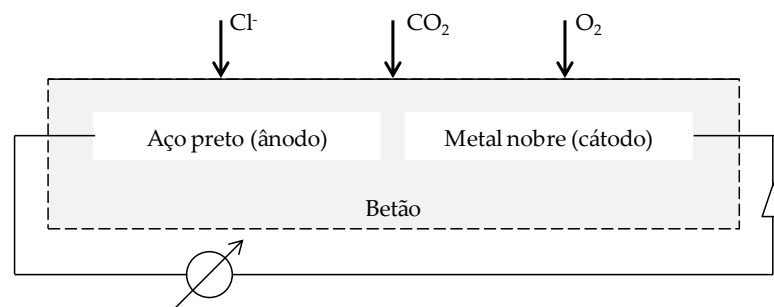


Figura 25 - Sensor constituído por um ânodo em aço preto e um cátodo em metal nobre.

Nas últimas décadas são várias técnicas que têm vindo a ser propostas e aplicadas na monitorização do betão armado, e cuja integração em sistemas de gestão da manutenção tem elevado potencial. Estas técnicas de monitorização podem classificar-se em cinco categorias principais, a saber: métodos eletroquímicos, métodos de ondas elásticas, métodos eletromagnéticos, deteção ótica e termografia por infravermelhos.

Entre as técnicas de monitorização eletroquímicas destacam-se a monitorização de potencial de circuito aberto (*Open circuit potential - OCP*), resistividade do betão (*Concrete Resistivity*) [132], resistência à polarização (*Linear Polarization Resistance - LPR*) [133], método de pulso galvanostático (*Galvanostatic Pulse Method - GPM*), correntes galvânicas de macro células (*Galvanic Cell*), espectroscopia de impedância eletroquímica (*Electrochemical Impedance Spectroscopy - EIS*) [134], espectroscopia de impedância eletroquímica localizada (*Localised Electrochemical Impedance Spectroscopy - LEIS*), o ruído eletroquímico (*Electrochemical Noise - EN*), Resistência Elétrica (*Bar Electrical Resistance - BER*) e Mapeamento de Potencial Superficial (*Surface Potential Survey*) [135].

Os métodos de ondas elásticas incluem a velocidade de pulso ultrassônico (*Ultrasonic pulse velocity* - UPV), a emissão acústica (AE) e o pulso eco ultrassônico (UPE).

Entre os métodos eletromagnéticos (EM), destacam-se o método do radar de penetração no solo (GPR) e o radar de penetração superficial (*Surface Penetrating Radar*), Radiografia de raios X, Tomografia Computorizada, Perturbação do Campo Magnético (*Magnetic Field Disturbance*).

No campo da detecção ótica estão enquadradas as redes de Bragg de fibra ótica (FBG). A última das categorias entre os métodos de monitorização anteriormente listados é a termografia por infravermelhos (*Infrared Thermograph* - IRT), que permite identificar defeitos em estruturas de betão, tais como a fissuração ou a delaminação.

3.4. Técnicas de monitorização

A monitorização de uma estrutura de betão armado pode ser efetuada com recurso à aquisição de dados com diferentes periodicidades. Os sistemas embebidos permitem efetuar leituras regulares coletando informação de um modo contínuo ao longo do tempo. Os sistemas não embebidos, que implicam a intervenção de um operador, tendem a ser utilizados para recolher leituras pontuais ao longo da vida da estrutura. Os sistemas embebidos têm a vantagem adicional de poder monitorizar tanto as zonas visíveis como as zonas de difícil acesso das estruturas.

3.4.1. Técnicas eletroquímicas

Nos itens que se seguem são analisadas as principais técnicas eletroquímicas utilizadas na monitorização do betão armado. As técnicas apresentadas permitem a leitura mais ou menos contínua das respetivas variáveis.

3.4.1.1. Medição do potencial eletroquímico

Todos os materiais tendem a interagir com o meio envolvente. No caso do aço embebido no betão esta interação ocorre entre o aço e o betão que o envolve e pode ser medida através do potencial elétrico da armadura. A medição do potencial permite estimar o estado de corrosão do aço.

A medição do potencial pode ser efetuada através de voltímetro, com elevada impedância, ligando o polo positivo à armadura e o polo negativo a um eletrodo de referência. Nos sistemas embebidos o eletrodo de referência está inserido no betão e está à superfície do betão, no caso dos sistemas portáteis, ver Figura 26. No primeiro sistema a ligação à armadura é efetuada antes da betonagem, sendo necessário que o aço esteja exposto para efetuar a ligação nos sistemas portáteis [136].

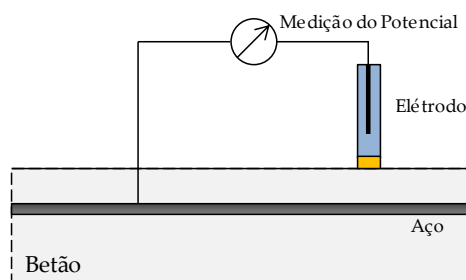


Figura 26 - Measurement of electrochemical potential.

Quando o potencial medido é inferior a - 500mV indica que o aço está num estado avançado de corrosão, sendo o risco de corrosão baixo quando o potencial é superior a -200mV, conforme Tabela 8 [136][137].

Tabela 8 - Potencial de corrosão [137].

Potencial de corrosão (mV)	Risco de corrosão
$E_{corr} > -200$	Baixo (inferior a 10%)
$-200 > E_{corr} > -350$	Intermédio
$E_{corr} < -350$	Alto (superior a 90%)
$E_{corr} < -500$	Corrosão severa

3.4.1.2. Medição da resistividade iónica do betão

A resistividade iónica do betão tem vindo a ser utilizada para a determinação do nível de contaminação iónica do betão, nomeadamente iões cloreto, e do avanço da frente de carbonatação. A resistividade iónica de um betão poroso depende, em primeiro lugar, da mobilidade e concentração de iões “livres”, transportadores de corrente, na solução que preenche a porosidade. A mobilidade iónica é uma característica intrínseca de uma espécie química variando, somente, com a temperatura. Ou seja, iões pequenos, como o hidrogénio, apresentam mobilidade elevada que aumenta com a temperatura. Todavia, a concentração iónica “livre” depende do teor de humidade no interior dos poros, do grau de contaminação por agentes externos e do equilíbrio de solubilidade dos diferentes sais que podem no líquido aquoso preencher os poros.

A resistividade do betão pode ser medida através da utilização de eléctrodos inseridos no betão ou colocados à sua superfície. Existem duas técnicas principais, a técnica dos dois eléctrodos e a técnica dos quatro eléctrodos. Ambas as técnicas têm como pressuposto a criação de um campo eléctrico alternado ou contínuo entre eléctrodos. Na técnica dos dois eléctrodos embebidos no betão, a resistividade pode ser medida a várias profundidades, através da criação de um campo eléctrico alternado entre os eléctrodos, em geral em aço inox, à mesma profundidade, criando uma corrente e medindo a diferença de potencial. Na técnica dos quatro eléctrodos, colocados à superfície do betão, o processo de medição mais comum passa pela criação de um campo eléctrico de corrente alternada entre eléctrodos exteriores e

medição do potencial entre os elétrodos interiores [138], conforme representado na Figura 27. A fórmula seguinte traduz a relação entre a resistência medida pelos elétrodos e a resistividade do betão:

$$\rho = 2\pi aR \quad (21)$$

sendo "a" a distância entre elétrodos.

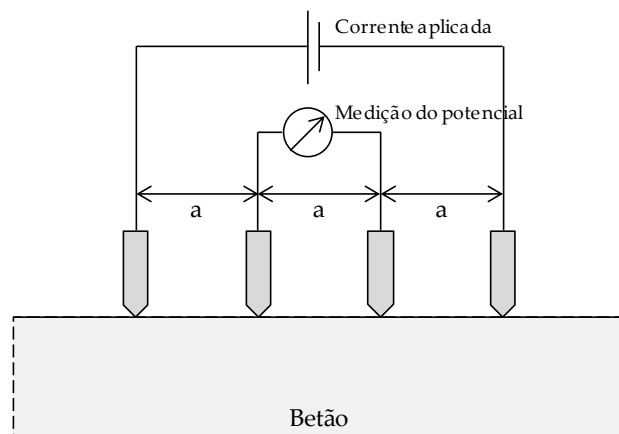


Figura 27 - Técnica dos quatro elétrodos.

É geralmente aceite que a um betão com resistividade superior a 20 $\Omega \cdot \text{cm}$ está associado um risco muito baixo de corrosão das armaduras e que para valores menores que 5 $\Omega \cdot \text{cm}$ é muito elevado o risco de corrosão, como se apresenta na Tabela 9. Existem, no entanto, variações significativas entre a resistividade de betões expostos a diferentes ambientes, mas a redução significativa da resistividade é um importante indício do risco de corrosão das armadura [139].

Tabela 9 - Resistividade iónica do betão [139].

Resistividade (kOhm.cm)	Risco de corrosão
$R > 20$	Negligenciável
$20 > R > 10$	Baixo
$10 > R > 5$	Elevado
$R < 5$	Muito elevado

3.4.1.3. Resistência de polarização linear

A resistência de polarização (R_p) pode ser definida como o declive da curva de polarização que resulta da razão entre o diferencial de potencial eléctrico e de corrosão da armadura, $E - E_{corr}$, e a intensidade da corrente de polarização I_E , ou seja:

$$R_p = \lim_{E \rightarrow E_{corr}} \frac{E - E_{corr}}{I_E} \quad (22)$$

A resistência à polarização está relacionada com a velocidade de corrosão, i_{corr} (a densidade da corrente de corrosão que circula entre as zonas anódicas e catódicas durante o processo de corrosão) através de [140]:

$$R_p = \frac{\beta_a \beta_c}{2,3 A i_{corr} (\beta_a + \beta_c)} \quad (23)$$

sendo “A” a área da armadura que está a ser inspecionada, β_a e β_c são os parâmetros de Tafel para os processos anódico e catódico, respetivamente. O coeficiente $\beta_a \beta_c / 2,3 / (\beta_a + \beta_c)$ varia entre 26 mV, para armaduras em fase ativa de corrosão, e 52 mV, para armaduras em estado passivo, no que se refere à corrosão [141], [5]. A Figura 28 mostra um sensor de medição da resistência de polarização linear.

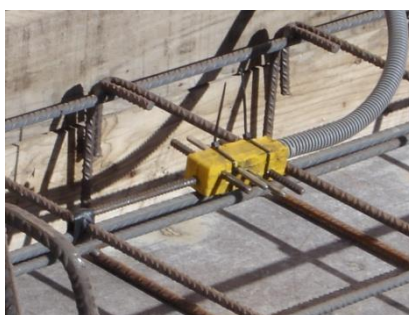


Figura 28 - Sistema MoniCorr para medição da resistência de polarização linear.

A determinação da R_p faz-se variando o potencial da armadura entre -10 e +10 mV do potencial de corrosão e registando a intensidade da corrente elétrica que circula entre a armadura e o eletrodo auxiliar colocado no interior do betão. Para além do eletrodo auxiliar, que impõe à armadura o potencial desejado, é necessário recorrer a um potencióstato, que permita impor um potencial constante e preciso a um eletrodo de referência, robusto e estável, também inserido no interior do betão, em relação ao qual os potenciais da armadura, eletrodo de trabalho, vão ser medidos. Como se pode ver pela equação (3), a aplicação deste método, implica o conhecimento rigoroso da área do troço da armadura do qual se está a determinar a resistência de polarização [142]. Na Tabela 10 apresenta-se a relação entre a corrente de corrosão e o estado do aço.

Tabela 10 - Velocidade de corrosão [5].

Corrente de corrosão (I_{corr})	Risco de corrosão
$I_{corr} < 0,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$	Negligenciável
$I_{corr} 0,1 - 0,5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$	Baixo
$I_{corr} 0,5 - 1,0 \mu\text{A}/\text{cm}^2$	Elevado
$I_{corr} > 1,0 \mu\text{A}/\text{cm}^2$	Muito elevado

A aplicação desta técnica pode ser realizada com um esquema tradicional de 3 elétrodos (referência, trabalho e auxiliar), esquema utilizado na generalidade dos sistemas, ou com 2 elétrodos iguais.

3.4.1.4. Pulso galvânico

A medição do pulso galvânico é uma técnica que remonta ao início dos estudos da corrosão dos metais, tendo sido utilizada também nos primeiros estudos relativos à interação aço betão. O método do pulso galvânico baseia-se na aplicação de uma corrente de polarização transitória num determinado período de tempo à armadura inserida no betão. Em geral, aplica-se uma corrente entre 10 e 100 μA com uma duração de 10 s [143]. Deste modo a armadura é polarizada no sentido anódico e compara-se o potencial de corrosão, sendo a alteração de potencial eletroquímico comparada com um eléctrodo de referência, que pode ser em aço inox ou em titânio [144]. Na Figura 29 apresenta-se um exemplo de um sensor para a medição do pulso galvânico.

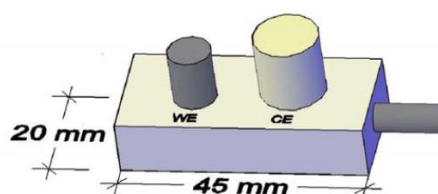


Figura 29 - Sensor galvânico composto por aço corrente e aço inox [144].

3.4.1.5. Espectroscopia de impedância eletroquímica (EIS)

A espectroscopia de impedância eletroquímica (EIS) é uma técnica não destrutiva que permite quantificar a corrosão das armaduras inseridas no betão. A impedância, Z , resulta da relação entre a tensão e a intensidade de corrente, para corrente alternada [145]. Esta técnica parte do pressuposto que um circuito eléctrico pode representar o comportamento do aço inserido no betão. A utilização deste método baseia-se na aplicação à armadura de um conjunto de pequenos sinais alternados sinusoidais de potencial entre 5 a 10 mV, sendo a resposta do sistema medida em corrente para um intervalo de frequências normalmente entre 0,1 Hz a 20000 Hz. A impedância em corrente alternada tem uma componente real (Z') e outra imaginária (Z''). A componente real da impedância representa a parte resistiva do sistema, enquanto a componente imaginária representa a parte capacitiva [139]. A representação da direcção e da grandeza do vetor impedância para cada frequência resulta no chamado diagrama de Nyquist, Figura 30.

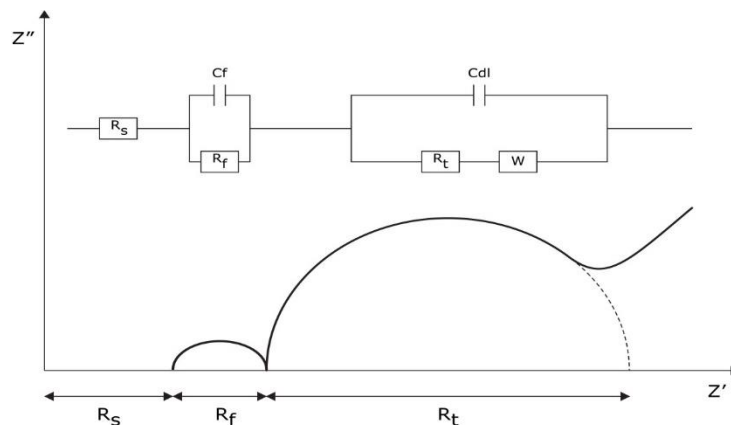


Figura 30 - Circuito equivalente para o sistema aço betão e representação no diagrama de Nyquist.

No sistema aço-betão o circuito equivalente mais usado é aquele que está também representado na Figura 30. A primeira rede RC pretende simular o filme ou camada de óxido de ferro que se forma à superfície do aço quando este está em contacto com o betão, e a segunda rede, o comportamento da dupla camada. Na mesma figura representa-se também a resposta deste circuito no diagrama de Nyquist. No diagrama de Nyquist obtido, a extrapolação do diâmetro do semicírculo da direita até o eixo dos Z' permite obter o valor da transferência à resistência de carga que é equivalente à resistência de polarização utilizada na equação de Stern-Geary, e utilizada nos sistemas de monitorização [146].

Esta técnica permite fornecer informações complementares sobre o processo corrosivo das armaduras, assim como as características dielétricas do betão e da camada de óxido que se forma sobre as armaduras nele inseridas. Esta técnica permite ainda a medição da velocidade de corrosão instantânea (R_p) e do tipo de mecanismo do fenómeno - ativação, concentração ou difusão.

3.4.1.6. Ruído eletroquímico

A medição do ruído eletroquímico é uma técnica de monitorização que pode fornecer informação sobre os mecanismos e as taxas de corrosão das armaduras inseridas no betão. Esta técnica baseia-se na análise da variação de potencial ou de corrente de fraca intensidade, da ordem dos microvolts, e permite detetar pequenas variações de corrosão das armaduras [139].

Os equipamentos utilizados neste processo são um micro voltímetro ou um micro amperímetro e um analisador de frequência que transforma a informação recolhida, ruído eletroquímico, em função do tempo em frequência através da transformada de Fourier, sendo os resultados apresentados graficamente na forma de amplitude versus frequência [5].

3.4.1.7. Eléctrodo de Ag/AgCl produzido por imersão em ácido hipoclorito de sódio

Para a detecção da presença de iões cloreto no betão Ming et al [147] propõem a utilização de um eléctrodo seletivo de iões cloretos produzido por imersão do fio de prata em solução de ácido hipoclorito de sódio. Este eléctrodo Ag/AgCl é produzido a partir de fios de prata com o diâmetro de 0,5 mm, conectados com fios de cobre, sendo a junção selada com resina epóxi, ficando uma área exposta de 7,85 mm², que corresponde a um comprimento de 5 mm. O fio de prata é sujeito a um pré-tratamento que incluiu a imersão em ácido nítrico (HNO₃), durante cerca de 10 min, seguido da imersão em etanol anidro com vibração, durante 5 min. O acabamento é obtido por imersão do fio numa solução ácida de hipoclorito de sódio, resultando um revestimento muito denso de AgCl na sua superfície. O eléctrodo de Ag/AgCl fica embutido no betão, sendo o seu potencial medido em relação a um eléctrodo de referência, que neste caso é de protocloreto de mercúrio (*SCE - Saturated Calomel Electrode*).

Segundo os autores [147] o eléctrodo Ag/AgCl apresenta boa reversibilidade, especialmente em soluções contendo iões cloreto. De referir que a temperatura a que o eléctrodo trabalha é importante, na medida em que influencia os resultados do potencial. Este eléctrodo apresenta como vantagens um baixo custo de fabricação, dimensões reduzidas, bom desempenho e robustez. Na Figura 31 mostra-se o esquema utilizado para ensaiar este sensor.

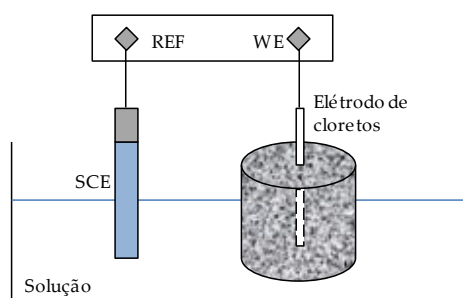


Figura 31 - Eléctrodo de Ag/AgCl embebido no centro de um provete [147].

3.4.2. Métodos de ondas elásticas

A medição de ondas em estruturas de betão pode ser efetuada com sistemas externos, tais como a velocidade de pulso ultrassónico e a tomografia de pulso.

3.4.2.1. Ensaio de velocidade de pulso ultrassónico

O ensaio por ultrassons é um dos mais antigos métodos não destrutivos para determinar o estado do betão, permitindo obter informações sobre as suas características mecânicas, homogeneidade e sobre a existência de vazios ou de fendas. Este ensaio baseia-se na medição do tempo que decorre entre a emissão de um impulso ultra sónico e a sua receção, conhecida a distância entre emissor e o recetor, ou seja, determina a velocidade de propagação do impulso ultra sónico entre dois pontos [148], [149]. Para se efetuar este ensaio utiliza-se um

dispositivo ultrassônico constituído por um transdutor de transmissão e um de recepção. O transdutor de transmissão produz um pulso de tensão que se propaga pelo betão, sendo o sinal recebido pelo transdutor de recepção. O dispositivo mede o tempo entre o envio do sinal e a sua recepção, determinando a velocidade de propagação da onda. Uma pequena parte da energia emitida é refletida de volta à superfície. A velocidade das ondas é mais reduzida nas zonas onde existem descontinuidades. Na Tabela 11 apresenta-se a classificação do betão em função da propagação de ultra sons segundo Whitehurst [150].

Tabela 11 - Classificação da qualidade do betão com base na velocidade da propagação de ultra sons [150], [151].

Velocidade (m/s)	Qualidade do betão
> 4500	Excelente
3500 a 4500	Boa
3000 a 3500	Regular
2000 a 3000	Fraca
< 2000	Muito fraca

3.4.2.2. Tomografia de pulso (ultrassónico)

A tomografia ultrassónica é uma técnica de inspeção não destrutiva que permite mapear o interior das estruturas, podendo fornecer informação fidedigna sobre descontinuidades ou danos existentes no seu interior. Esta técnica baseia-se no princípio da reconstrução da imagem com recurso à avaliação de uma série de projeções de medições feitas a partir de diferentes ângulos, ou seja, estima-se a imagem real do objeto em estudo. A fidelidade deste método depende do processo de aquisição e pré-processamento dos dados através de métodos matemáticos de reconstrução. A geração de imagens tomográficas pode ser categorizada em técnicas de retroprojeção filtrada e reconstrução iterativa [152].

As técnicas de reconstrução iterativa são baseadas na resolução de sistemas de equações algébricas geradas a partir de medições, cuja solução é um mapa de velocidades. Relacionando estes dados com as características elásticas dos materiais é possível detetar descontinuidades e danos nos elementos em estudo.

Haach et al [152] referem que alterações na resistência à compressão do betão conduzem a velocidades de propagação diferentes, reduzindo a velocidade com o aumento da resistência. Em paralelo concluíram que a distribuição relativamente uniforme das velocidades ultrassonográficas observadas indica que a técnica tomográfica para a avaliação da uniformidade das estruturas de betão é adequada, sendo a análise da homogeneidade do betão por tomografia ultrassónica mais eficiente que a simples análise dos valores das velocidades das ondas. A Figura 32 apresenta um tomograma obtido através desta técnica.



Figura 32 - Tomograma obtido no transdutor a 250 kHz.

3.4.3. Detecção ótica

A detecção ótica envolve a utilização de sistemas baseados em fibra ótica, cuja instalação é geralmente efetuada no interior das estruturas, podendo, no entanto, também ser instalado no exterior. Em termos de leitura, estes sistemas permitem uma recolha contínua de dados.

3.4.3.1. Redes/Grade de Bragg de fibra ótica

Os sensores de rede/grade de Bragg de fibra ótica (FBG) podem ser utilizadas na monitorização da temperatura, tensão, deslocamento, pressão e, indiretamente, da corrosão. Este tipo de sensor reflete num determinado comprimento de onda e transmite noutro, produzindo uma variação periódica do índice de refração do núcleo da fibra por irradiação com laser ultravioleta. O sensor propriamente dito, a grade de Bragg, é um segmento pequeno do núcleo da fibra ótica exposto a uma luz ultravioleta, que quando atuado produz alterações no comprimento de onda refletido. A luz refletida corresponde a um comprimento de onda específico, sendo a luz dos restantes comprimentos de onda transmitida através das rede/grade de Bragg [153].

Qualquer deformação, seja por alteração da temperatura, pressão ou vibração, aplicada nesta grade altera o comprimento de onda do laser e alterações na magnitude das reflexões. Estas alterações permitem efetuar medições precisas, que podem ocorrer por períodos de tempo longos ou extremamente curtos. Assim, a quantificação da ação sobre o sensor pode ser determinada através da relação entre as propriedades físicas e o comprimento de onda refletido do sensor FBG [154]. A Figura 33 apresenta o esquema de funcionamento de um sensor FBG segundo Kim et al. [155].

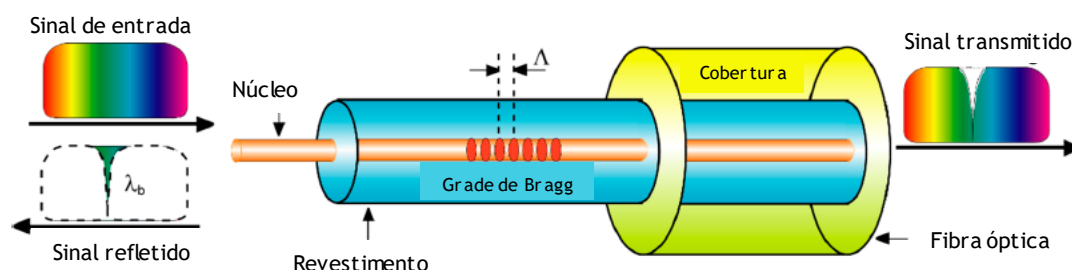


Figura 33 - Princípio de funcionamento de um sensor FBG, adaptado de [155].

Os sensores FBG sem proteção são muito frágeis, pelo que precisam de ser envoltos numa cápsula que os proteja. O design da cápsula tem que ser elaborado de forma a permitir que o

sensor funcione e ao mesmo tempo esteja protegido. A forma e o material das capsulas dos sensores FBG variam em função do tipo de medição pretendida e do local de instalação [156].

Os sensores FBG possuem um conjunto de características que torna o seu uso muito apelativo, entre as quais se destacam a sua insensibilidade aos campos eletromagnéticos, as reduzidas dimensões e o peso, que os torna adequados a serem incorporados ou fixados a qualquer estrutura. A sua ligação ao exterior é efetuada pela própria fibra ótica que serve de canal de propagação do sinal para o sistema de controle. Acresce, que estes sensores possuem excelente resolução e alcance, são imunes a condições climáticas adversas, são resistentes à água e à corrosão [157].

Sensores de temperatura FBG funcionam com base na alteração dos comprimentos de onda em resposta a mudanças de temperatura. Estes sensores são protegidos por uma pequena caixa de aço. A configuração deste transdutor permite manter livre uma das suas extremidades, deixando o varão de aço inox dilatar-se em função da variação da temperatura, permitindo o funcionamento do sensor FBG [158].

Os sensores de tensão funcionam com base na alteração do comprimento de onda que resulta da tensão aplicada, que produz alongamento da grade. Estes sensores são ligados diretamente à superfície da estrutura a monitorizar, de forma a terem uma deformação solidária com a deformação da estrutura.

Os sensores de deslocamento estimam a deformação da estrutura em função da sua deformação. Estes sensores permitem medir o alongamento, ou encurtamento entre os dois pontos onde está ancorado [158].

Durante o processo de corrosão das armaduras o volume da ferrugem produzida é cerca de quatro a seis vezes maior que o volume do ferro original. Estando a armadura confinada pelo betão, este acréscimo de volume introduz tensões de tração internas no betão envolvente, conduzindo, quando esta tensão excede a resistência à tração do betão, à sua fissuração [159], [160]. Almubaied et al. estudaram o comportamento dos sensores FBG instalados na face da armadura tendo concluído que os sensores tem boa sensibilidade à progressão do processo de corrosão [15].

3.4.4. Termografia por infravermelhos

A termografia por infravermelhos é uma técnica de monitorização e diagnóstico que permite detetar anomalias superficiais e internas, tais como vazios, delaminação e fissuras. Esta técnica baseia-se na medição da transferência de calor superficial de um corpo, que ocorre por radiação e por condução, através da deteção da radiação infravermelha, situada na região do espectro eletromagnético entre a luz visível e as micro-ondas.

A radiação é o mecanismo através do qual uma superfície emite energia por unidade de área, que pode ser determinada através da lei de Stefan-Boltzmann. Qualquer objeto com temperatura diferente de zero absoluto ($-273,15^{\circ}\text{C}$ ou 0°K) irradia energia na forma infravermelha [16]. Os fatores que determinam o nível da radiação infravermelha emitida por um material são a temperatura deste e a sua emissividade. A emissividade, que varia entre 0 e 1, é uma propriedade do material definida pela relação entre a capacidade da sua superfície emitir energia por radiação e a energia irradiada por um corpo negro, cuja emissividade é unitária ($e=1$) devido ao facto de possuir transmissividade e a refletividade nulas. A emissividade do betão varia entre 0,88 e 0,94, função da rugosidade da superfície e do teor em humidade.

A câmara de infravermelhos produz uma imagem visual a partir da conversão do padrão de radiação térmica da superfície em estudo [161]. Esta tecnologia não mede a temperatura do objeto em estudo, mas identifica os diferentes níveis de emissão de radiação. A imagem obtida é influenciada pela existência de outros materiais na superfície do betão, tais como manchas, água ou pinturas, que possuem emissividades diferentes. O estado do tempo influencia os resultados, se por um lado a luz solar pode aumentar a temperatura da superfície, por outro o vento pode diminuir a sua temperatura, tal como a chuva. Todos estes fatores podem contribuir para realçar as diferenças de temperatura na superfície em estudo, permitindo uma melhor identificação das anomalias [162].

A termografia pode ser efetuada com recurso a fonte de calor externas ou fonte de calor natural. No primeiro caso é necessário criar um estímulo térmico artificial. No segundo caso, que é a abordagem sugerida pela norma ASTM D 4788 [163], são utilizadas as fontes de calor naturais, efetuando-se medições durante o dia e durante a noite, para se obterem imagem que com fluxos térmicos para o interior do betão e fluxos de calor inversos, respetivamente, conforme se mostra na Figura 34.

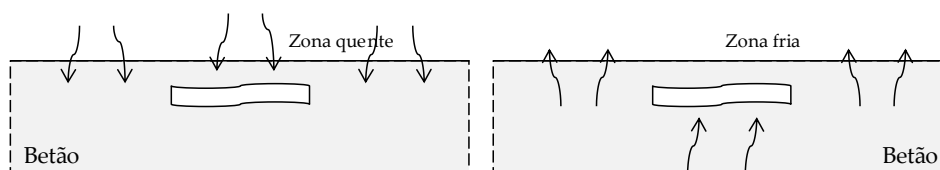


Figura 34 - Efeitos de uma anomalia interior no fluxo de calor superficial.

A norma ASTM D 4788 [163] define os critérios que devem ser aplicados na determinação da delaminação de tabuleiros de pontes de betão armado através da utilização da termografia por infravermelhos. São diversos os autores que tem explorado a utilização desta tecnologia, nomeadamente Clark et al., que conseguiram identificar delaminações em tabuleiros de pontes com diâmetros inferiores a 20 cm [162], já Cannard et al., conseguiram identificar defeitos com áreas de cerca de 4 cm^2 [164]. Mais recentemente, Caldeira et al. utilizaram esta tecnologia para identificar danos de aderência entre o betão e tiras de reforço em

polímeros reforçados com fibras de vidro (GFRP) [165]. Neste estudo foram utilizadas várias fontes de calor externas, designadamente lâmpada incandescente, lâmpada de sódio de alta pressão e aquecedor de convecção, tendo concluído que o tipo de aquecimento influencia a qualidade da avaliação termográfica e a uniformidade do fluxo de calor nas amostras.

Com a massificação da tecnologia dos drones surgiu a utilização de veículos aéreos não tripulados para a obtenção de imagens termográficas. Omar et al., estudaram esta tecnologia tendo identificado como vantagem imediata o permitir a circulação de veículos durante os ensaios, que é extremamente interessante nas zonas de tráfego intenso e por permitir que se efetuem as inspeções com maior frequência, em função das necessidades. Esta tecnologia também permitirá que se alargue o número de estruturas inspecionadas, pelo ganho de tempo e redução de custos que lhe estão associados. Este tipo de tecnologia poderá ser uma ferramenta importante para a gestão dos processos de manutenção, por permitir avaliar as condições das pontes em diversos estágios da sua vida útil, contribuindo para a recolha de informação suplementar, que permitirá fundamentar as tomadas de decisão relativas às operações de manutenção. Apesar da generalidade dos estudos se centrarem na avaliação dos tabuleiros de pontes de betão armado esta tecnologia também pode ser utilizada nos outros componentes da ponte [16].

3.4.5. Sistemas de identificação por radio frequência

Os sistemas de identificação por radio frequência, não sendo sensores, podem ser elementos de apoio muito interessante a um sistema de manutenção multifuncional. Estes sistemas, usualmente designados por RFID (*Radio-Frequency Identification*), são constituídos por um leitor ligado a uma antena, que permite deteção e leitura de etiquetas com informação armazenada. Estas etiquetas são compostas por um circuito integrado e uma pequena antena encapsulados [166]. Um computador, conectado ao leitor, gere o sistema através de uma aplicação adequada [167].

As antenas podem identificar as etiquetas a diversas distâncias em função do objetivo pretendido, existindo sistemas que permitem a leitura a pequenas distâncias, alguns centímetros, até sistemas que permitem a leitura a distâncias maiores, até cerca de 100m. Para a escolha do tipo de etiquetas a adotar é relevante a sua capacidade de armazenamento de dados e a posição em que irá ser colocada em obra. A frequência de operação dos dispositivos dependem de vários parâmetros, designadamente da necessidade de modificar o conteúdo das etiquetas, a proteção da privacidade dos dados, os materiais utilizados ou a portabilidade do leitor [166].

Após a construção os sistemas RFID também podem ser utilizados para tornar mais eficiente o trabalho das equipas de manutenção, através da sua instalação nos diversos equipamentos que serão objeto de manutenção ao longo da vida da construção, permitindo monitorizar a

sua condição ou desempenho. Segundo Cheng et al. estes dispositivos também se podem incorporar durante a construção em materiais ou elementos estruturais, armazenando informação. Isto permitiria transferir dados desde a fase de projeto até à fase de manutenção, conduzindo a que seja o próprio edifício a fornecer dados, aumentando a eficiência do sistema de manutenção [168].

3.4.6. Análise das técnicas de monitorização

Para a implementação da monitorização de uma estrutura pode recorrer-se a sensores embebidos no betão, sendo as leituras efetuadas com determinada periodicidade, ou por utilização de equipamentos que permitem a obtenção de leituras à superfície do betão, de utilização pontual. Para algumas das técnicas existem as duas possibilidades, como é o caso da medição da resistividade que tanto pode ser medida através de sensores embebidos no betão, como através do método dos quatro elétrodos de utilização externa. Na Tabela 12 apresenta-se o tipo de utilização para cada uma das técnicas.

Tabela 12 - Técnicas de monitorização.

Técnicas de monitorização	Sensores embebidos	Sistemas externos
Técnicas eletroquímicas		
Potencial de circuito aberto	X	X
Resistividade do betão	X	X
Resistência à polarização	X	X
Método de pulso galvanostático		X
Espectroscopia de impedância eletroquímica	X	
Ruído eletroquímico		X
Elétrodo de Ag/AgCl (ácido hipoclorito de sódio)	X	
Métodos de ondas elásticas		
Velocidade de pulso ultrassônico		X
Tomografia de pulso		X
Deteção ótica		
Redes de Bragg de fibra ótica	X	
Termografia por infravermelhos		
Termografia por infravermelhos		X

As técnicas de monitorização apresentadas têm sido testadas, ao longo dos últimos anos, em laboratório, mas também em estruturas reais. A generalidade dos estudos foca a importância de recorrer a duas ou mais técnicas em simultâneo, com o intuito de garantir um elevado nível de fiabilidade na análise dos resultados. Este tipo de sistemas tem sido instalado em inúmeras estruturas reais, entre as quais se podem referir:

- Aeroporto da Madeira e a ponte infante D. Henrique, cujos sistemas instalados permitem medir a intensidade de corrente galvânica, a resistividade, a temperatura e o potencial de corrosão [169];
- Barragem do Alto Ceira, onde se monitoriza a deformação do betão, o movimento das juntas e a temperatura com recurso a sensores de fibra ótica [158];
- Ponte a Norte de London (Ontário, Canada), monitorização com recurso a câmara de infravermelhos instalada em drones [16].

Do ponto de vista da manutenção, os sistemas embebidos têm a vantagem de fornecerem informação do comportamento de uma determinada variável ao longo do tempo. Estes sistemas podem ser instalados em zonas de difícil acesso após a conclusão da construção, tais como as fundações ou paredes enterradas. A monitorização com sistemas embebidos não deve inibir a utilização de equipamentos de uso externo, na medida em que os sensores não permitem a cobertura da totalidade da superfície da estrutura. Neste sentido, a par da utilização de sensores, devem ser efetuadas inspeções regulares, que permitam detetar eventuais degradações não detetáveis com os sistemas instalados, e inspeções pontuais, resultantes de informações recolhidas na monitorização. A integração da informação recolhida num modelo 3D, que incorpora a informação relativa à construção, facilita a análise detalhada das degradações detetadas. A utilização de etiquetas de identificação e de armazenamento da informação (RFID) inseridas nos elementos estruturais facilita o acesso a dados durante as inspeções e aumenta a sua eficácia.

3.5. Conclusões

A digitalização e a automação conduzirão o setor da construção para um novo patamar de eficiência, eliminando fatores não fundamentais. Na área da manutenção dos edifícios será a metodologia BIM o elemento charneira deste processo de desenvolvimento, através da qual será possível integrar de forma progressiva novas ferramentas de trabalho. Esta integração terá um impacto muito grande nos custos de gestão das instalações, que correspondem a mais de 65% dos custos de operação do edifício.

A implementação de sistemas de gestão da manutenção, com recurso a sensores de monitorização do betão armado, integrado no processo BIM, envolve a utilização de modelos 3D, sistemas de monitorização e a respetiva interface de interligação. Destes três componentes, o desenvolvimento da interface envolve custos relativamente baixos quando comparada com os custos da produção dos modelos BIM e da instalação do sistema de monitorização. Este processo terá um forte impacto na redução do tempo gasto à procura de informação para a implementação de tarefas de manutenção.

Do ponto de vista da adequação dos sistemas para a sua integração em BIM podem destacar-se, pela experiência de utilização e pela fiabilidade de utilização, a monitorização do potencial

de corrosão, da resistividade iónica do betão e a resistência de polarização. Estas técnicas eletroquímicas, juntamente com as soluções de fibra ótica são técnicas que dão garantias de funcionamento aos sistemas.

Para a manutenção, a existência destes novos modelos de gestão da informação, facilitará a introdução de sistemas de monitorização automatizados, fomentando a utilização de sensores, resultado do aumento da capacidade de acomodar e organizar a informação recolhida. Em consequência, será possível adquirir e gerir um maior volume de informação, de forma contínua no tempo e sem intervenção humana. Este processo de automação tem interesse para todo o sistema de gestão dos edifícios, na medida em que permite gerir as variáveis ambientais (temperatura, humidade, renovação de ar) dos diferentes espaços, controlar o funcionamento dos diversos equipamentos instalados ou medir e analisar indicadores relativos ao estado de conservação de elementos estruturais ou não estruturais.

Os sistemas de monitorização estrutural apresentados são suscetíveis de serem integrados como ferramentas de gestão da manutenção em modelos 3D. A sua incorporação na metodologia BIM, apresenta a vantagem adicional de permitir, de forma mais intuitiva, a interpretação dos resultados com recurso à localização espacial de cada um dos sensores. Os resultados da monitorização de construções em funcionamento demonstram o interesse dos dados obtidos para os processos de manutenção e realçam a necessidade da conjugação da leitura de dois ou mais parâmetros, de modo a garantir um elevado índice de fiabilidade do sistema.

Os donos de obra do futuro vão querer ter para as suas construções informação integrada, estruturada e facilmente acessível. Este desígnio só será alcançado com a utilização de plataformas integradoras de informação e sistemas.

Financiamento

O trabalho foi financiado por INNOACE, “Innovación abierta e inteligente en la EUROACE”, (Interreg V-A Espanha-Portugal - POCTEP - 0049_INNOACE_4_E)

Capítulo IV

Monitorização eletroquímica da degradação de estruturas de betão

Este capítulo consiste no seguinte capítulo de livro:

Monitoring electrochemical degradation of concrete structures

Paulo S.D. Brito and Pedro Romano

Publicado no livro "Recent Patents on Corrosion Science", Volume 3, Issue 2, Pp 156-163, com o DOI: 10.2174/2210683903666131227193149

Resumo

Neste trabalho pretende-se fazer uma revisão dos principais sistemas de monitorização da degradação de estruturas de betão armado com ligas de ferro que têm vindo a ser patenteadas nos últimos 10 anos.

Como o processo de degradação é, na maioria dos casos, um processo de corrosão eletroquímica da armadura provocada por ações químicas sobre a estrutura, os sistemas são na sua generalidade sistemas que determinam grandezas eletroquímicas.

Os sistemas são, essencialmente, conjunto de eléctrodos com diferentes arranjos que permitem implementar várias técnicas eletroquímicas, tais como, resistência de polarização linear, espectroscopia de impedância eletroquímica, ruído eletroquímico, condutividade iónica, no sentido de obter informação sobre potenciais e velocidades de corrosão da armadura e velocidades de penetração de agentes agressores.

Palavras Chave: Monitorização eletroquímica, monitorização, degradação de betão armado

4.1. Degradação de estruturas de betão armado

A degradação de estruturas de betão armado é um problema que apresenta grandes impactos económicos e ambientais. A degradação deste tipo de estruturas está muito relacionada com a corrosão das armaduras. O ferro das armaduras dentro do betão encontra um ambiente químico favorável, um pH superior a 12, que faz com que o ferro da armadura esteja numa situação de passivação. Todavia, em certas situações, o ferro despassiva e inicia um processo de corrosão. As situações de despassivação passam essencialmente ou por abaixamento de pH do betão, provocado por fenómenos de carbonatação e lixiviação ácida, ou por penetração de iões agressivos, tais como os iões cloretos, que ao chegar à armadura, iniciam um processo de corrosão por picadas. Depois de se iniciar a degradação do ferro da armadura, os produtos da corrosão apresentam um volume superior ao ferro que lhe deu origem, provocando tensões internas e consequentes surgimento de fissuras. A partir desse momento é que é possível haver uma perceção visual do fenómeno [170].

Este tipo de patologias do betão armado acontece depois de haver uma alteração continuada e sistemática do betão na sua camada de recobrimento por ação de agentes externos. A cinética destas alterações, ou seja, a velocidade de penetração e o tempo que demora a atingir a armadura, dependem do tipo de betão, da sua porosidade e da presença de aditivos, em particular, do tipo e teor de cinzas pozolânicas (cinzas volantes) adicionadas. Quando atinge o ferro, normalmente, já torna muito difícil implementar medidas corretivas às estruturas no sentido de minimizar os fenómenos corrosivos. As reparações nessa fase envolvem quase sempre a remoção da camada contaminada, reposição de ferro e betonagem. Tais reparações são, em muitos casos, da mesma ordem de grandeza de uma obra nova [74].

É neste contexto que surge a necessidade de ter sistemas que permitam obter informação da estrutura, ao longo do tempo, no sentido de poder ir monitorizando o processo de penetração de agentes que degradam o betão e o próprio processo de corrosão do ferro, nas suas várias etapas, em particular, na fase de iniciação [170].

4.2. A monitorização permanente do fenómeno degradativo

A monitorização do fenómeno degradativo envolve a utilização de sensores incorporados dentro da estrutura de betão que continuamente dão informação sobre o seu estado em termos de corrosão. Os sensores deverão permitir recolher um conjunto de informação de natureza similar à que se obtém com as técnicas de inspeção abordadas anteriormente. A utilização deste conceito de inspeção permanente apresenta várias vantagens. Uma das principais vantagens é a utilização de sensores que estão dentro da própria estrutura betão armado, sentindo o efeito do próprio meio interno e de todas as suas alterações temporais. Por outro lado, na maioria das grandes estruturas há zonas de difícil acesso inviabilizando a sua regular inspeção, com auxílio de sistemas tradicionais de monitorização. Com o uso de

sensores embebidos permanentemente essas zonas poderão ser continuamente inspecionadas. Em termos económicos, o conceito de monitorização e inspeção permanentes tem vindo a ter grande aceitação considerando que permite ao gestor de manutenção de uma estrutura perspetivar atempadamente, numa fase embrionária do processo degradativo, em que ainda não é manifesto a corrosão da estrutura, medidas corretivas de combate a custos significativamente mais baixos [142].

Nos últimos 10 anos, diferentes tipos de sistemas de monitorização da corrosão de estruturas de betão armado têm vindo a ser patenteados internacionalmente, e são objeto de apresentação neste trabalho. Estes sistemas não são mais que conjuntos de sondas e elétrodos, que permitem uma aplicação de diversas técnicas de análise, e que podem estar, ou não, ligadas a um sistema autónomo de processamento, tratamento e envio de informação.

Apesar de haver sistemas que utilizam técnicas magnéticas, eletromagnéticas, tais como, Radiografia, Tomografia Computadorizada, Radar de Penetração de Superfície, Distúrbio do Campo Magnético, a maioria dos sistemas utilizam técnicas eletroquímicas, tais como, Potencial Eletroquímico, Resistência de Polarização Linear (LPR), Espetroscopia de Impedância Eletroquímica (EIS), Ruído Eletroquímico, Método do Pulso Galvanotático (GPM), Resistência Elétrica da Armadura (BER), Resistividade do Betão, entre outras. De facto, sendo o processo de degradação essencialmente um processo envolvendo reações eletroquímicas, faz todo o sentido que as técnicas privilegiadas para a monitorização do processo em termos cinéticos e termodinâmicos sejam técnicas eletroquímicas [171].

A aplicação das técnicas eletroquímicas referidas, e que irão ser abordadas em maior pormenor no tópico seguinte, requerem, de uma forma geral, conjuntos de elétrodos metálicos, uns com elevado grau de nobreza e outros de natureza igual ou similar ao material que se está pretende monitorizar a degradação (aço macio). Por outro lado, muitos deles incorporam elétrodos eletroquímicos de segunda ordem para que se possa ter referências, sensores específicos a determinadas espécies químicas, tais como, iões cloreto, acidez (pH). Os conjuntos que são incorporados na estrutura, apresentam dimensões relativamente pequenas e são quase todos para instalação antes de se betonar a estrutura ficando presos à armadura metálica. No sentido de isolar as ligações elétricas necessárias às várias sondas e elétrodos, as mesmas são ou colocadas no interior de caixas com elevado grau de impermeabilização ou imobilizadas em resinas. A título de exemplo, nas figuras seguintes, estão apresentadas seis representações esquemáticas de sistemas de sensores que permitem a monitorização de estruturas de betão armado desenvolvidos recentemente [172], [173], [174], [175]. Na Tabela 13 é apresentado um resumo das principais patentes estudadas neste trabalho.

Tabela 13 - Características das patentes estudadas.

Número	Ano	País	Técnicas							Ref.
			Potencial	Eléctrodo Auxiliar	Determinação da velocidade de corrosão	Condutividade Técnica	Condutividade Eléctrodos	Cl	pH	
CN202533356U	2012	China	Ag/AgCl	Ti-MMO	LPR	4 eléctrodos	Aço Inox	Ag/Ag Cl	Ti/IrO _x	[172]
CN102680387A	2012	China	Ag/AgCl	Ti-MMO	LPR	4 eléctrodos	Aço Inox	Ag/Ag Cl	Ti/IrO _x	[182]
CN102401781A	2012	China	Ag/AgCl							[183]
CN102721642A	2012	China	MnO	Platina Molibdénio	LPR					[177]
CN202033274U	2011	China			Resistência Eléctrica					[192]
CN201945546U	2011	China	MnO	Aço Inox	LPR					[178]
KR20120029303A	2012	Correia			Resistência Eléctrica					[174]
US2012 / 0043981A1	2012	Estados Unidos		Eléctrodo externo	LPR					[190]
US2011 / 0259092A1	2011	Estados Unidos			LPR (2 eléctrodos)	4 eléctrodos	Titânio	Ag/Ag Cl	Ir ₂ O ₃ /Ta ₂ O ₅	[176]
CN101706408A	2010	China		Aço Inox	Par galvânico					[195]
CN101893593A	2010	China		Aço Inox	Noise					[191]
US2010 / 0108510A1	2010	Estados Unidos			Par galvânico					[175]
CN101334353A	2008	China	MnO ₂	Aço Inox	LPR			Ag/Ag Cl	IrO ₂ /Ir ₂ O ₃	[179]
CN201212876Y	2008	China	MnO ₂	Aço Inox	LPR			Ag/Ag Cl	IrO ₂ /Ir ₂ O ₃	[180]
CN101315324A	2008	China	MnO ₂	Aço Inox	LPR			Ag/Ag Cl	IrO ₂ /Ir ₂ O ₃	[181]
CN101256135A	2008	China		Aço Inox	Par galvânico					[188]
CN101226164A	2008	China	Mo/MoO ₃							[187]
CN101144769A	2008	China	Ag/AgCl	Aço Inox	Noise					[184]
CN101299018A	2007	China	Ag/AgCl	Aço Inox	LPR					[185]
CN101144790A	2008	China	Ag/AgCl							[186]
SI22559(A)	2008	Eslovênia			Resistência Eléctrica					[193]
US2006 / 0125480A1	2006	Estados Unidos			Impulso, Impedância					[173]
PT2011/104554	2011	Portugal				2 eléctrodos	Aço Inox			[194]
PT2001/102269	2001	Portugal	Grafite	Aço Inox	LPR	2 eléctrodos	Aço Inox			[189]

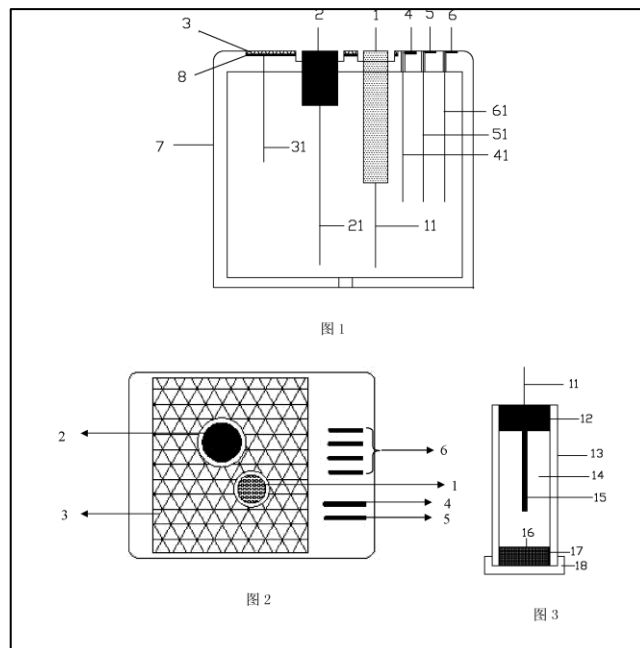


Figura 35 - Representação esquemática do sistema apresentado na patente chinesa CN202533356U que tem conjuntos de sondas que permite determinar o potencial eletroquímico do ferro, a velocidade de corrosão, a condutividade do betão, o pH e a concentração de iões cloreto [172].

4.3. Técnicas de análise

Como já referido, são várias as técnicas que são implementadas nos vários sistemas e que podemos dividir em: a) medição do potencial de corrosão; b) medição da velocidade de corrosão; c) medição das variáveis ambientais (concentração de iões agressivos, pH).

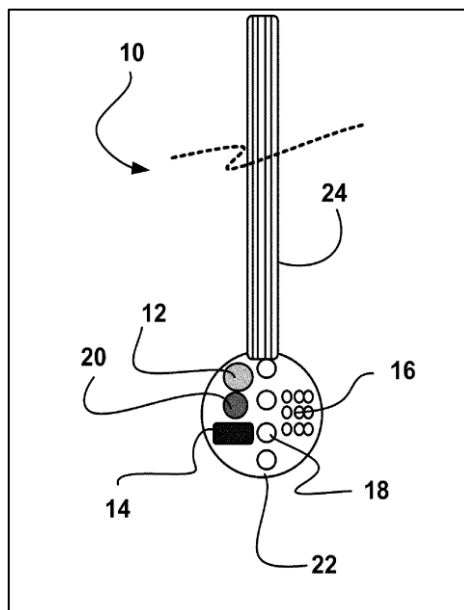
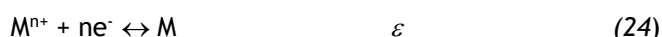


Figura 36 - Representação esquemática do sistema apresentado na patente americana US2011/0259092A1 que tem conjuntos de sondas que permite determinar a velocidade de corrosão, a condutividade do betão, o pH e a concentração de iões cloreto [176].

4.3.1. Medição do Potencial de corrosão

A maioria dos sistemas patenteados permite a leitura do potencial de corrosão do aço da armadura. Para efetuar tal medida, deverão ser instalados elétrodos junto à armadura no sentido de evitar os erros inerentes às leituras externas de potenciais relacionados com a elevada resistência do betão de recobrimento. Os elétrodos de referência mais utilizados têm sido de manganês/óxidos de manganês (Mn/MnO_2) [177], [178], [179], [180], [181], de prata/cloreto de prata ($Ag/AgCl$) [182], [183], [184], [185], [186], [187], de molibdénio/óxido de molibdénio (Mo/MoO_3) e ainda os de grafite [185] que funcionam como pseudo referências.

Este tipo de elétrodos de referência são elétrodos de 2ª ordem do tipo:



que apresentam grande estabilidade. Todavia, são elétrodos que funcionam em meio aquoso o que requer utilização de caixas e membranas de retenção no sentido de garantir longevidade dentro das estruturas de betão.

Apesar de as medidas do potencial da armadura fornecerem uma boa indicação do seu estado de corrosão, uma avaliação baseada apenas nesta informação pode mostrar-se muito limitada em determinadas situações já que o valor do potencial medido pode ser influenciado por outros fenómenos eletroquímicos à superfície do metal que não os relacionados com a degradação deste.

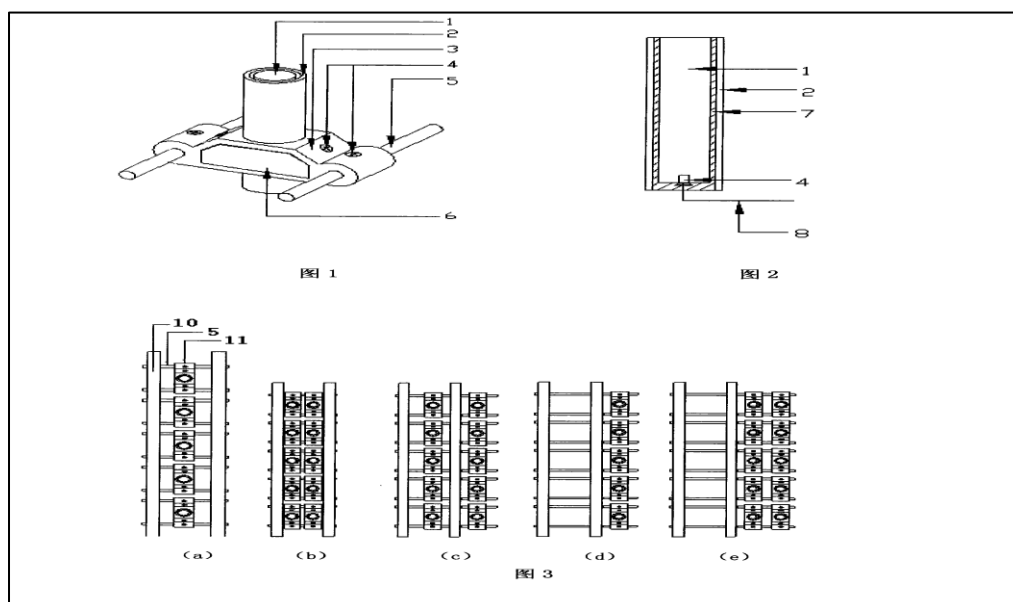


Figura 37 - Representação esquemática do sistema apresentado na patente chinesa CN101256135A para determinação da velocidade de corrosão pela técnica do par galvânico [188].

O potencial de corrosão de qualquer material metálico é o resultado da conjugação das cinéticas (velocidade e mecanismo) de, pelo menos, dois processos: a oxidação do metal que

se está a corroer (nas zonas ditas anódicas) e a redução (que se dá à superfície do metal em regiões catódicas) de uma espécie química presente no ambiente circundante do material, normalmente, o oxigénio molecular. Porém, dependente do ambiente, pode haver mais que uma espécie química sujeita a redução à custa da oxidação do metal. O valor do potencial permite avaliar se o ferro se encontra num estado de corrosão ativa, passivado ou protegido por ação de um outro processo de oxidação (“proteção catódica”). É geralmente aceite que para valores de potencial de corrosão acima de 100 mV (relativo ao eletrodo normal de hidrogénio) a armadura está numa situação de passividade, ou seja, o produto da corrosão é um hidróxido que confere propriedades de barreira [170].

4.3.2. Velocidade de corrosão

Do ponto de vista da engenharia de corrosão, os aspetos cinéticos são de grande importância já que só com base na sua consideração se pode obter uma velocidade de corrosão instantânea do processo. Experimentalmente, a cinética do processo corrosivo só pode ser acedida através de técnicas perturbativas em que o sistema constituído pelo metal sob corrosão e o meio corrosivo é temporariamente deslocado da situação estacionária, caracterizada pelo potencial elétrico de corrosão e por um fluxo global de cargas nulo. Para o efeito, o sistema é “polarizado” impondo externamente, através de uma fonte de alimentação contínua, um fluxo de corrente elétrica. Das várias técnicas eletroquímicas que permitem o estudo cinético da corrosão e que têm sido referências nas várias patentes são, o método da Resistência à Polarização Linear (LPR) [177], [178], [179], [180], [182], [184], [189], [190], [176], da Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIS) [173], [177], ruído eletroquímico (EN) [173], [177], [184], [191], a resistência elétrica [174], [192], [193], e a macro célula galvânica (GM) [175], [193], [188]. Em todas elas procura-se rapidez, elevada reprodutibilidade e facilidade de interpretação dos dados adquiridos.

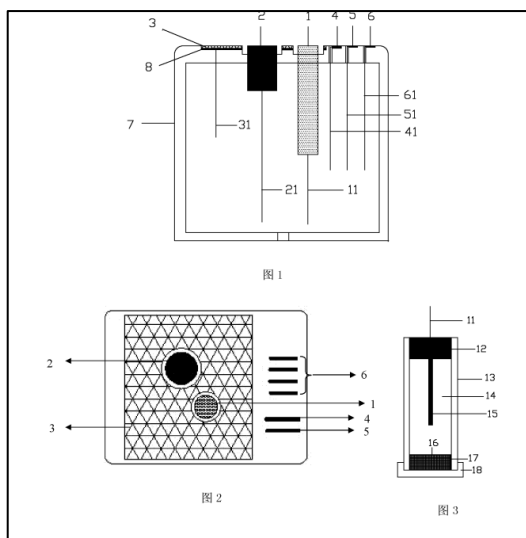
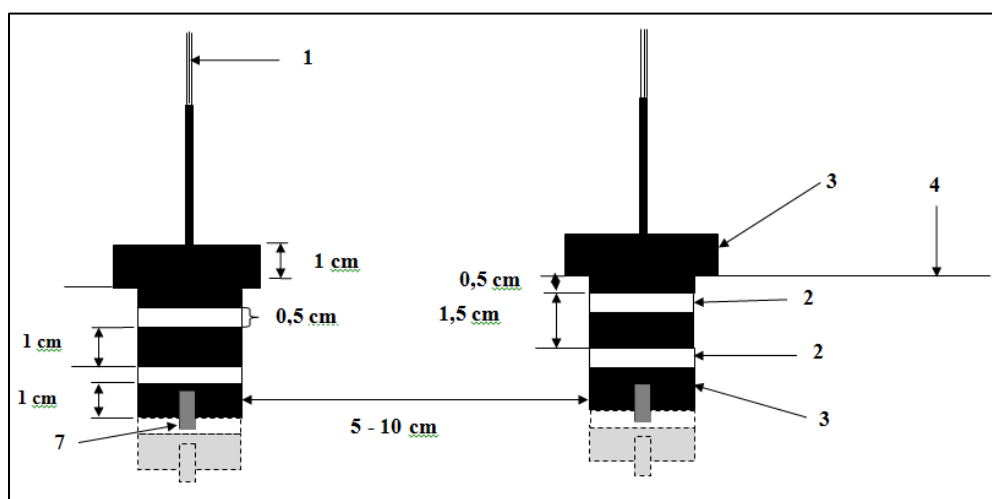
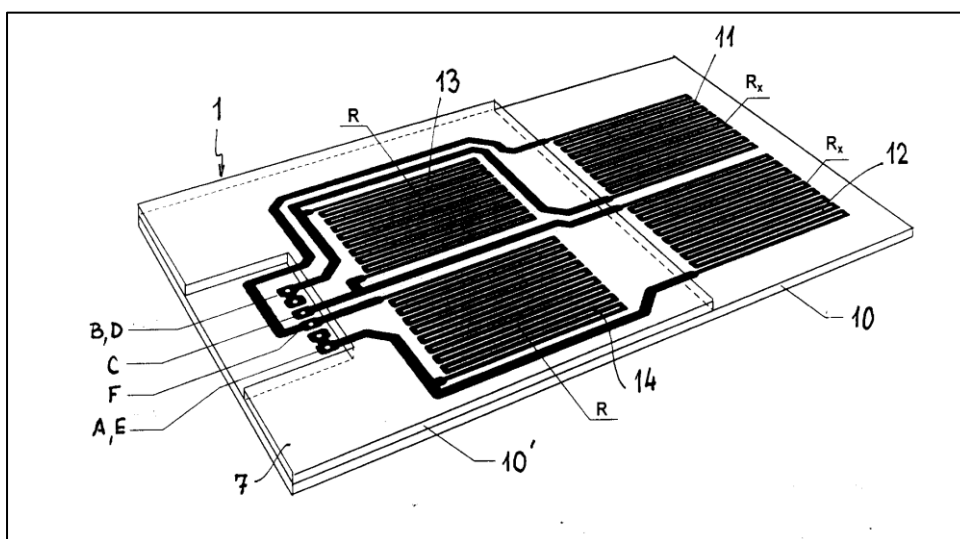


Figura 38 - Representação esquemática do sistema apresentado na patente chinesa CN202533356U para determinação da velocidade de corrosão pela técnica da resistência elétrica [184].



$$R_p = \lim_{E \rightarrow E_{corr}} \frac{E - E_{corr}}{I_E} \quad (26)$$

A resistência à polarização está relacionada com a velocidade de corrosão, i_{corr} (a densidade da corrente de corrosão que flui entre as zonas anódicas e catódicas durante a corrosão) através de:

$$R_p = \frac{\beta_a \beta_c}{2,3 A i_{corr} (\beta_a + \beta_c)} \quad (27)$$

onde A é a área local da armadura que está a ser inspecionada β_a e β_c são os chamados parâmetros de Tafel para os processos anódico e catódico, respetivamente. O coeficiente $\beta_a \beta_c / 2,3 / (\beta_a + \beta_c)$ varia entre 26 mV, para armaduras claramente ativas, e 52 mV, para armaduras passivas.

Na prática, a determinação da R_p faz-se variando o potencial da armadura entre -10 e +10 mV do potencial de corrosão e registando a intensidade da corrente elétrica que flui entre a armadura e um eletrodo de auxiliar colocado a superfície do betão. Para além deste eletrodo que serve para impor a armadura o potencial desejado, é necessário possuir um dispositivo que permita impor um potencial muito constante e preciso, o potenciostato, um eletrodo de referência, robusto e estável, também à superfície do betão, em relação ao qual os potenciais da armadura (eletrodo de trabalho) vão ser lidos. Como se pode inferir da equação (4), a aplicação deste método, implica o conhecimento rigoroso da área do troço da armadura do qual se está a determinar a resistência de polarização.

A aplicação desta técnica pode ser realizada com um esquema tradicional de 3 eletrodos (referência, trabalho e auxiliar), esquema utilizado em praticamente todas as patentes apresentadas, ou com 2 eletrodos iguais, situação preconizada por uma das patentes [176].

4.3.4. Espectroscopia de Impedância Eletroquímica

A técnica de impedância parte do pressuposto que um determinado circuito elétrico mais ou menos elaborado pode representar o comportamento do aço macio dentro do betão. Na prática, aplica-se à armadura séries de pequenos sinais alternados sinusoidais de potencial entre 5 a 10 mV, e avalia-se a resposta do sistema em corrente para um intervalo de frequências normalmente entre 0,1 Hz a 20000 Hz, Da razão entre a tensão e a intensidade obtém-se então a impedância que neste caso da corrente alternada tem uma componente real (Z') e outra imaginária (Z''). A componente real da impedância representa a parte resistiva do sistema enquanto a componente imaginária representa a parte capacitiva. Quando se representa a direção e a grandeza do vetor impedância para cada frequência obtém-se o chamado diagrama de Nyquist (ver Figura 41).

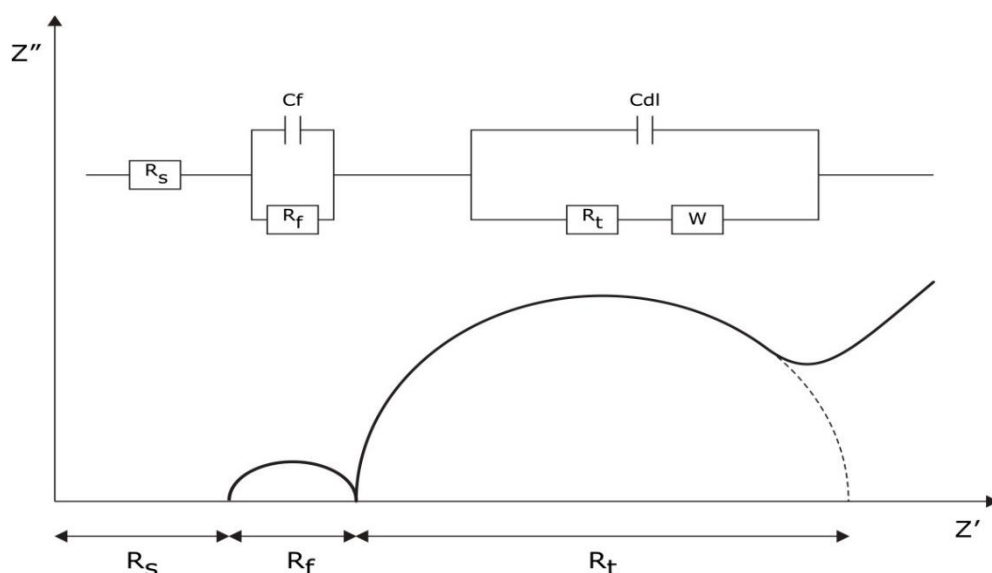


Figura 41 - Circuito equivalente para o sistema aço betão e representação no diagrama de Nyquist.

No sistema aço-betão o circuito equivalente mais usado é aquele que está também representado na Figura 41. A primeira rede RC pretende simular o filme ou camada que se forma à superfície do aço quando este está em contacto com o betão, e a segunda rede, o comportamento da dupla camada. Na mesma figura representa-se também a resposta deste circuito no diagrama de Nyquist. No diagrama de Nyquist obtido, a extrapolação do diâmetro do semicírculo da direita até o eixo dos Z' permite obter o valor da transferência à resistência de carga que é equivalente à resistência de polarização utilizada na equação de Stern-Geary, e utilizada nos sistemas de monitorização.

Uma das principais mais-valias desta técnica é a de fornecer informações complementares sobre o processo corrosivo em si, como as características dielétricas do betão e da camada de óxido que se forma sobre o varão de aço, para além da medição da velocidade de corrosão instantânea (R_p) e do tipo de mecanismo do fenómeno, (ativação, concentração, difusão).

4.3.5. Ruído eletroquímico

O ruído eletroquímico é uma técnica recente para avaliar o estado de corrosão de estruturas de betão armado. O princípio baseia-se no facto de que existem flutuações no potencial de corrosão ou na densidade de corrente ao longo do tempo que podem ser relacionadas com a iniciação e desenvolvimento do estado corrosivo, em particular, o surgimento de picadas. Estes impulsos, principalmente no caso de corrosão localizada, são gerados espontaneamente durante o processo corrosivo e podem permitir identificar o tipo de corrosão e a velocidade do processo corrosivo. Na Figura 38 está representado um sistema de medição de ruído eletroquímico [184], [191], [196], [197].

Assumindo que os processos corrosivos têm natureza aleatória, é possível obter informações sobre os fenómenos que ocorrem durante o processo de corrosão sem perturbar o sistema, a

partir da análise das flutuações aleatórias do potencial ou corrente versus tempo. O ruído eletroquímico pode ser definido como flutuações espontâneas de potencial e corrente em torno de um estado estacionário. O ruído pode ser o resultado de vários fenómenos corrosivos e ter características diferentes, relacionadas ao tipo de mecanismo de corrosão, localizado ou uniforme. Do ponto de vista técnico, a monitorização deve ser feita continuamente, com um equipamento de alta sensibilidade, que permita medir flutuações aleatórias do potencial ou da intensidade de corrente entre duas barras de aço ao longo do tempo.

4.3.6. Resistência elétrica

Esta é uma técnica de monitorização que permite determinar velocidades médias de corrosão por determinação da quantidade de metal que se oxidou em função do tempo. Esta técnica permite, simultaneamente, obter informação sobre fenómenos puramente eletroquímicos, tais como corrosão uniforme, picadas, e sobre aspetos de degradação conjugada com fenómenos mecânicos, tais como, cavitação, erosão. Por outro lado, tem-se verificado que este sistema é muito útil na monitorização da corrosão de materiais em meios muito pouco condutores, onde a realização de ensaios de carácter mais eletroquímico é mais difícil de executar por falta de condutividade iónica do meio.

O fundamento da técnica reside no facto de a resistência elétrica (R) de um metal, ou de uma liga metálica, ser uma função da secção de passagem da corrente elétrica de acordo com a seguinte expressão:

$$R = \rho_e (L/A) \quad (28)$$

onde ρ_e é a resistividade elétrica do material, L o seu comprimento e A a sua secção.

Com o evoluir de um processo corrosivo a secção do material vai diminuindo, por conversão do metal num produto não condutor eletronicamente, aumentando, assim, a sua resistência elétrica global. Comparando esta técnica com outras técnicas verifica-se que nesta não há necessidade de limpar a sonda pois os produtos formados são não condutores.

Para uma sonda cilíndrica a velocidade de corrosão, expressa em variação de espessura por unidade de tempo, é determinada pela seguinte expressão:

$$\text{Velocidade de corrosão} = (\rho_e L)^{1/2} \Delta(R^{-1/2}) / \Delta t \quad (29)$$

4.3.7. Macro célula galvânica

A intensidade de corrente que circula entre duas armaduras próximas dentro do betão pode ser medida e utilizada como um indicador do nível de corrosão dessas próprias armaduras. Esta técnica foi utilizada pontualmente como uma forma de monitorização da corrosão no betão e está normalizada na ASTM G109 (2005) [198]. De forma a assegurar sempre a

presença de um ânodo e de um cátodo é introduzido junto à armadura um metal mais nobre como o aço inoxidável 316L ou até titânio. Constrói-se, desta forma, uma macro célula que permite medir a intensidade da corrente entre esses dois metais sendo a corrente obtida uma informação direta do estado de passivação do aço. As macro células galvanotáticas podem ser usadas para avaliar o progresso das condições de corrosão através da instalação de ânodos a diferentes profundidades. Assim, podemos prever a evolução das condições de despassivação da armadura.

4.4. Variáveis ambientais

O desenvolvimento de um processo corrosivo das armaduras depende do estado de contaminação do betão. Assim, muitos dos sistemas de monitorização desenvolvidos determinam diretamente variáveis ambientais, tais como pH e teor de cloretos [172], [179], [182], [176], e/ou a variável indireta condutividade iónica do betão que permite determinar as variações de concentração iónica e de humidade do betão, em particular, na camada de recobrimento das estruturas [172], [182], [189], [176], [194].

4.4.1. Condutividade iónica do betão

A condutividade iónica pode ser útil para se avaliar o nível de contaminação iónica de uma estrutura de betão, nomeadamente, a contaminação por iões cloreto, se souber ser esta a causa do fenómeno, como caso de estruturas implantadas em ambientes marinhos. Por outro lado, as medidas de condutividade permitem comparar a porosidade de betões de diferentes composições ou aplicados com o recurso a técnicas ou em betonagens diferentes, uma vez que, evidentemente, a condutividade do betão aumenta com o aumento da porosidade do mesmo.

A condutividade iónica de um betão poroso depende, em primeiro lugar, da mobilidade e da concentração de iões “livres”, transportadores de corrente, no interior do mesmo. A mobilidade, mede a velocidade linear a que os iões se movimentam no seio de uma solução aquosa e é uma característica intrínseca do ião, dependendo essencialmente dos seus tamanhos e carga e também temperatura que influencia não só a energia cinética do próprio ião bem como a viscosidade do próprio meio. No que respeita a concentração iónica “livre”, esta depende, evidentemente, do teor de humidade no interior dos poros, do grau de contaminação externa e da solubilidade dos diferentes sais que ali se podem formar. Assim, condutividades elevadas implicam a existência de concentrações iónicas elevadas e, como tal, meios potencialmente mais agressivos em termos de corrosão.

A condutividade iónica de um betão é, normalmente, determinada com base em duas técnicas: a dos 2 elétrodos e a dos 4 elétrodos. Na técnica dos 2 elétrodos a resistividade do betão (a

condutividade é o inverso da resistividade) é determinada com base na razão entre o valor de uma tensão alternada, aplicada entre dois elétrodos iguais, encostados à superfície do betão, e a respetiva resposta em termos da intensidade de corrente alternada. O cálculo entra, também, em linha de conta com o parâmetro da célula, que é função da separação entre os elétrodos e a área geométrica comum. A técnica dos 4 elétrodos ou de Wenner, utiliza 4 elétrodos igualmente espaçados de uma distância. A resistência à passagem da corrente entre os dois elétrodos centrais, é determinada através da medição da queda de tensão (V) quando é aplicado um campo contínuo entre os dois elétrodos mais externos, fazendo circular entre eles uma corrente contínua de intensidade I.

4.4.2. Determinação de espécies químicas

A determinação do pH e da concentração de cloretos permitem fazer uma previsão do estado de corrosividade do betão permitindo prever qual o comportamento do ferro em termos de corrosão. De facto, valores baixos de pH e teores elevados de cloretos, como referido em tópico anterior, conduzem a situações de despassivação da armadura com progressão de um processo corrosivo. Os elétrodos que têm vindo a ser instalados são essencialmente elétrodos de 2ª ordem de Ag/AgCl, para medição do teor de cloretos, e de óxidos de irídio, que respondem aos hidrogeniões.

4.5. Conclusões

Têm vindo a ser desenvolvidos e patenteados um conjunto de sistemas de monitorização da degradação de estruturas de betão armado que envolvem conjunto de sondas e elétrodos, com diferentes arranjos, que permitem implementar várias técnicas eletroquímicas, tais como, resistência de polarização linear, espectroscopia de impedância eletroquímica, ruído eletroquímico, condutividade iónica, no sentido de obter informação sobre potenciais e velocidades de corrosão da armadura e velocidades de penetração de agentes agressores.

Um conjunto muito significativo de sistemas patenteados apresentam ligações a sistemas eletrónicos dedicados para aquisição, processamento e envio dos resultados.

Julga-se ser de grande importância e relevância para a tomada de posição, em termos de manutenção, de donos de estruturas em betão armado.

Financiamento

O trabalho foi financiado por RITECA, “Red de Investigación Transfronteriza de Extremadura, Centro y Alentejo”, (POCTEC - 0318_RITECA_4_E, 2008).

Capítulo V

Parte experimental

O trabalho experimental foi desenvolvido com o intuito de se obter e validar dados provenientes da monitorização de estruturas de betão armado ao longo do tempo, de forma a identificar diferentes fases da degradação do betão armado, nomeadamente a deteção do desencadear do processo de corrosão das armaduras. Para alcançar este objetivo foi necessário criar condições de exposição ambiental que, de algum modo, conduzissem a um processo acelerado de degradação do betão. Para este fim escolheram-se três tipos de exposição ambiental, dois para acompanhar em laboratório, em condições controladas, e um *in situ*, numa estrutura em funcionamento. Em laboratório simulou-se um ambiente salino, com a utilização de uma solução composta por 3% de cloreto de sódio, e um ambiente ácido, com a utilização de uma solução constituída em partes iguais por 2,5% de sulfato de sódio e 2,5 % de sulfato de magnésio. Para o estudo em ambiente real escolheu-se uma ETAR, cujos efluentes se caracterizam pela sua elevada agressividade. Para determinar os efeitos da contaminação do betão em profundidade efetuaram-se furações pontuais para extração de pó de betão que foi posteriormente analisado por fluorescência de raios X (XRF).

Em laboratório utilizaram-se dois sistemas de monitorização eletroquímica, MoniCorr e ConduitiCorr, o que permitiu a recolha de uma maior variedade de dados. *In situ* recorreu-se ao sistema ConduitiCorr, constituído por um par de elétrodos circulares para medição da resistividade, o que facilitou a sua instalação na estrutura em operação, na medida em que a instalação dos sensores pode ser efetuada por perfuração das paredes de betão existentes. Em laboratório, o estudo da degradação do betão foi efetuado com a utilização de vários tipos de armadura para se aferir a influência deste parâmetro no processo degradativo. Utilizaram-se armaduras correntes, pintadas e protegidas catodicamente por galvanização e por corrente imposta.

Este capítulo tem como objetivo apresentar e descrever a componente experimental realizada neste trabalho, no sentido de atingir os objetivos apresentados no capítulo 1. Assim, são apresentados os materiais, os ensaios e os sistemas utilizados na monitorização dos provetes de betão armado, bem como os procedimentos adotados na monitorização da ETAR de Portalegre.

Primeiro procede-se à descrição e caracterização dos materiais utilizados e o processo adotado para a execução de provetes, em sequência são descritos os procedimentos adotados nos ensaios realizados e no fim são apresentados os equipamentos utilizados na monitorização eletroquímica do betão.

5.1. Materiais

Para a implementação dos ensaios foram efetuados dois conjuntos de 12 provetes de betão com quatro tipos de armaduras, ou seja, três provetes para cada tipo de armadura. Estes provetes possuem uma forma paralelepipedica, cujas dimensões são 400mm de comprimento, 300mm de largura e 150mm de altura, foram moldados em caixas construídas com chapas de aglomerado de madeira revestido por melamina em ambas as faces.

5.1.1. Armaduras

As quatro soluções de reforço do betão adotadas tem como base os varões de aço macio nervurado do tipo A400NR, com 10 mm de diâmetro e com espaçamentos de 100 mm numa direção e 150 mm noutra. As armaduras foram posicionadas de forma a garantir uma camada de recobrimento de 30 mm. Estas armaduras foram utilizadas nos provetes protegidas catodicamente, galvanizadas, pintadas ou sem proteção, conforme se apresenta nas Figura 42 e Figura 43.



Figura 42 - Molde com armadura com proteção catódica (esquerda) e galvanizada (direita).



Figura 43 - Molde com armadura pintada (esquerda) e sem proteção (direita).

A proteção catódica foi obtida através imposição de uma corrente elétrica que garante um potencial negativo de 850mV aplicada entre a armadura e a rede de titânio colocada na camada de recobrimento e separada dos varões de aço por uma tira de borracha. Para a aplicação da corrente elétrica recorreu-se as fontes de alimentação apresentadas na Figura 44. A galvanização foi obtida por imersão dos varões de aço em zinco, de modo a criar uma camada protetora uniforme. Para a proteção da armadura por pintura recorreu-se à aplicação de uma camada de tinta acrílica.



Figura 44 - Fontes de alimentação utilizadas para imposição da corrente catódica nos ensaios com cloretos (esquerda) e nos ensaios com sulfatos (direita).

5.1.2. Betão

Os betões utilizados nos ensaios foram produzidos em centrais dedicadas à produção deste tipo de material. Para a execução dos provetes destinados aos ensaios com cloretos recorreu-se a um betão com classificação, em termos de resistência, C30/37 e classe de exposição ambiental à carbonatação XC3. A composição deste betão cumpre os critérios definidos na NP EN 206-1 [37]. Na Tabela 14 apresenta-se a composição dos betões e na Tabela 15 apresenta-se a informação fornecida pelo produtor.

Tabela 14 - Composição dos betões utilizados.

Componente	Dosagem (kg/m ³)
Areia fina (0 - 2 mm)	302
Areia grossa (0 - 4 mm)	506
Brita 1	1016
Cimento	340
Água	170

Tabela 15 - Especificação do betão fornecida pelo produtor.

Ref. normativa	Gama de betão especial	Classe de resistência	D _{máx.} Agr.	Classe exp. ambiental	Classe de cloretos	Classe de Consistência	Observações
NPEN206-1	-	C30/37	D16	XC3 (P)	Cl0,2	S2	-
	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-

5.1.3. Execução dos provetes

Foram executados dois tipos de provetes, os primeiros, já referidos no início deste capítulo, possuem uma forma paralelepípedica com arestas de 400 mm, 300 mm e 150 mm, sendo o segundo conjunto constituído por provetes com forma cúbica com arestas de 150mm, tendo sido utilizados moldes plásticos e metálicos para a sua moldagem. Após a colocação do betão nos moldes procedeu-se à sua vibração de forma a eliminar os vazios no seu interior e uniformizar o betão. Após a desmoldagem, que ocorreu 24 horas após a betonagem, os provetes foram mantidos imersos em água durante 28 dias.



Figura 45 - Provetes cúbicos com 150 mm de aresta, produzidos em moldes plásticos e metálicos, após a betonagem, durante a desmoldagem e a serem imersos em água.

5.1.4. Exposição ambiental

Como já foi referido, foram desenvolvidos ensaios com betões expostos à ação de cloretos, sulfatos e em ambiente real na ETAR de Portalegre.

5.1.4.1. Contaminação com cloretos e sulfatos

Nos ensaios relativos à contaminação com cloretos utilizou-se uma solução salina composta por 3% Cloreto de Sódio (NaCl), dissolvidos em água com recurso a um agitador. Para a exposição aos sulfatos, seguiram-se as indicações da norma ASTM C 1012-4 [199], tendo-se adotado uma solução composta por 2,5% de sulfato de sódio e 2,5% de sulfato de magnésio. Na Figura 46 apresenta-se o processo de preparação da solução de sulfato de sódio e magnésio.



Figura 46 - Preparação da solução de sulfato de sódio e magnésio.

O processo de contaminação dos provetes de betão foi efetuado, tanto para os cloretos como para os sulfatos, através da colocação de um recipiente construído com placas de poli-metacrilato de metil (PMMA) e parafusos metálicos, com tampa, mas sem fundo em contacto com o betão. A figura mostra o método utilizado para a contaminação dos provetes.

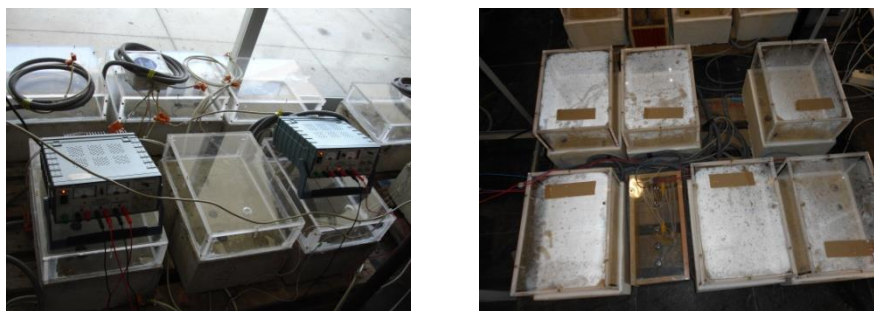


Figura 47 - Recipientes fixados sobre os provetes de betão para permitir a sua contaminação com cloretos (à esquerda) e sulfatos (à direita).

5.1.4.2. Contaminação com águas da residuais

A ETAR de Portalegre é uma estação convencional constituída por quatro órgãos principais, todos em betão armado, a saber: o pré-tratamento, o reator biológico, o recirculador de lamas e a decantação secundária. Nesta ETAR foi efetuada a monitorização em três equipamentos através da perfuração, de fora para dentro, das paredes de betão existentes com uma broca do diâmetro da sondas a instalar. Os furos efetuados foram posteriormente selados pelo exterior. Os sistemas foram instalados no poço de bombagem, onde o betão está exposto a gases provenientes de lamas, numa das paredes da caixa de recirculação de lamas, estando o betão exposto a ciclos de secagem e molhagem com lamas provenientes do decantador secundário, e no decantador secundário, onde o betão está permanentemente submerso por águas, já sujeitas a este tratamento, conforme indicado na Figura 48.

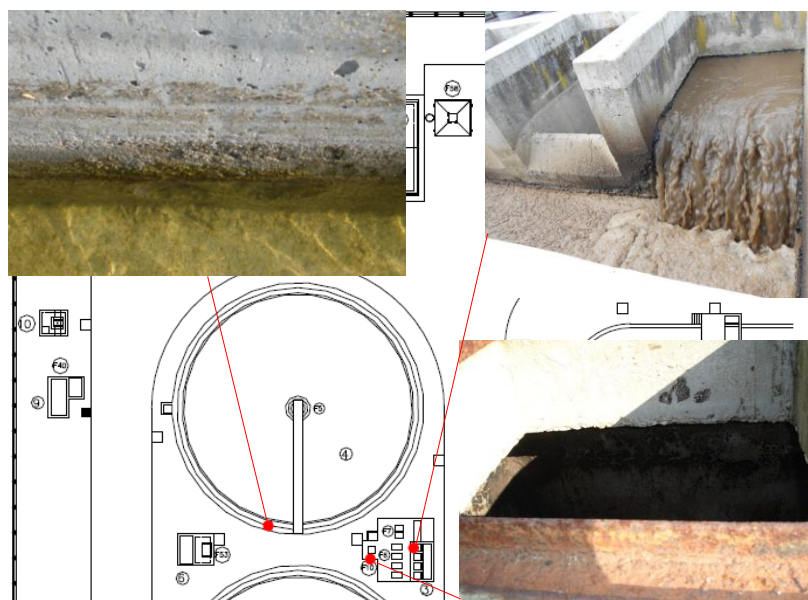


Figura 48 - Localização dos sensores na ETAR de Portalegre.

5.2. Ensaios

5.2.1. Fluorescência de raios X (XRF)

A determinação da composição química de amostras de betão exposta a agentes degradativos foi efetuada por fluorescência de raios X. Esta tecnologia baseia-se na absorção, por um determinado material, de uma energia específica emitida por raios X, que origina a reemissão de radiação com uma energia diferente (geralmente mais baixa e com características próprias), permitindo deste modo identificar a composição química da amostra. Esta tecnologia pode ser utilizada com amostras sólidas, líquidas ou em pó e enquadra-se nos métodos de diagnóstico não destrutivos. Na Figura 49 apresenta-se o equipamento utilizado nos ensaios.



Figura 49 - XRF (Florescência de raio X).

Para determinar a profundidade de penetração e a concentração de cloretos e de sulfatos no betão da camada de recobrimento das armaduras, foi efetuada a perfuração deste, tendo-se procedido à extração de pó de betão a várias profundidades. O teor total em cloretos e o teor em enxofre foi determinado analisando o pó recolhido por espectroscopia de fluorescência de raios X (XRF). Na figura seguinte apresentam-se amostras utilizadas nos ensaios.



Figura 50 - Pó de betão extraído do provete R1 (esquerda) e provetes 10 e 12 (direita).

5.2.2. Determinação de cloretos livres e fixos

Na situação específica dos cloretos procurou-se quantificar, dentro do teor total determinado por espectroscopia de fluorescência de raios X, qual era a parcela volátil. Para a determinação de cloro livre e do pH recorreu-se a um processo de lixiviação com água destilada. Este procedimento baseou-se na colocação de 5 g de amostra de pó de cimento num balão de decantação, onde previamente era colocado um volume de 50 ml de água

destilada. Após o fecho do balão, este era sujeito a uma agitação enérgica, seguida de um período de 24 horas de repouso. Ao fim deste período a mistura foi filtrada e efetuou-se a medição do valor de pH da solução. O bolo de filtração, após lavagem com água destilada, foi seco em estufa durante 24 horas a 100°C e, de novo, foi determinado o seu teor em cloretos por XRF. A percentagem de cloretos livres na massa original resulta da diferença entre as duas determinações. Na figura seguinte apresenta-se uma das amostras de pó de betão.

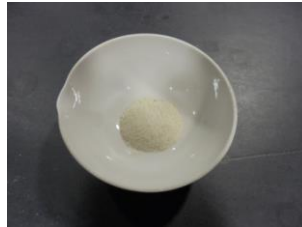


Figura 51 - Pó de betão extraído do provete R1.

5.2.3. Ensaio de resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão é um método destinado a verificar o nível de resistência de provetes de betão endurecido quando sujeitos a esforços de compressão. Nestes ensaios foram utilizados provetes cúbicos de betão submetidos a uma carga axial de compressão aplicada por um êmbolo metálico, tendo-se registado a força máxima aplicada com o objetivo de determinar a classe de resistência à compressão do betão em MPa. Deste modo foi possível certificar que as características do betão estão de acordo com o pretendido, designadamente no que se refere à sua classificação em termos de resistência mecânica.

O ensaio de compressão foi realizado de acordo com a norma NP EN 12390-4 [200], com recurso a uma prensa da marca Tecnotest, modelo KL 300/CE. Antes da execução dos ensaios foram limpos os pratos da máquina de ensaio e procedeu-se à limpeza das faces dos provetes. Estes foram colocados na prensa no centro do prato inferior e posicionados de maneira a que a carga fosse aplicada perpendicularmente à direção de moldagem. Durante o procedimento de ensaio a carga foi aplicada com uma velocidade constante de 0,50 MPa/s ($\text{N/mm}^2.\text{s}$), tendo-se registado a carga máxima obtida.



Figura 52 - Prensa para ensaios de compressão.

A classificação do betão em termos de resistência, expressa com uma aproximação de 0,5 MPa, é obtida com base nos resultados dos ensaios à compressão dos provetes de betão pela aplicação da seguinte expressão:

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad (30)$$

sendo :

f_c - resistência à compressão (MPa);

F - carga máxima de rotura (N);

A_c - área da secção transversal do provete (mm²).

Na análise dos resultados foi verificada a forma como se processou a rotura dos provetes, de modo a validar os ensaios. A caracterização do betão em termos de resistência à compressão resultou da média das resistências obtidas em três ensaios considerados válidos.

5.2.4. Carbonatação

A determinação da frente de carbonatação foi efetuada segundo a especificação E-391 [201], através da utilização do indicador de fenolftaleína com teor alcólico de 0,1%. Para este efeito, recorreu-se à extração de carotes dos provetes de betão ensaiados, tendo-se extraído os carotes em faces do provete não expostas à ação dos cloretos. Na figura seguinte apresenta-se a caroteadora e os provetes extraídos.



Figura 53 - Caroteadora e a determinação da frente de carbonatação nos provetes de betão extraídos.

5.3. Sistema de monitorização

A degradação de uma estrutura de betão armado é um processo lento que resulta da interação entre este e o meio envolvente. Mesmo nos ensaios acelerados, como os desenvolvidos neste trabalho, a degradação do betão ocorre de forma faseada no tempo e evolui do exterior para o interior até chegar à zona da armadura criando condições para desencadear o fenómeno de corrosão desta. Neste enquadramento é relevante obter informações ao longo do tempo para aferir a velocidade com que os fenómenos degradativos se desenvolvem. A recolha deste tipo de informação é possível através da utilização de sistemas de monitorização que recolham informação com uma determinada regularidade.

Existem diferentes tipos de ensaios acelerados de degradação de estruturas de betão, como por exemplo o proposto pela norma NT Build 492 [202], que permite medir o coeficiente de difusão dos cloretos. A opção pelos ensaios desenvolvidos neste trabalho, com recurso a provetes com armaduras inseridas, resulta do interesse em aproximar as condições dos ensaios realizados em laboratório com as condições das estruturas reais, de modo a permitir a extrapolação dos resultados.

Para a monitorização recorreu-se a sistemas que medem parâmetros eletroquímicos pela facilidade de inserção no betão e por permitirem a recolha de dados de forma relativamente simples em intervalos de tempo previamente estipulados. Com estes sistemas foi possível medir parâmetros como a resistividade, potenciais de corrosão e resistência de polarização, sobre os quais já há estudos que permitem comparar resultados.

5.3.1. Determinação da velocidade de corrosão - sistema Monicorr

A velocidade de corrosão de um metal é um parâmetro que mede a cinética do processo corrosivo. Para este efeito é necessário recorrer a técnicas que perturbam o funcionamento do sistema constituído pelo metal em corrosão e o meio onde ele está inserido. Esta perturbação pode ser induzida pela imposição de um fluxo contínuo de corrente elétrica, através do recurso a uma fonte de alimentação. Para este efeito, um dos métodos mais utilizados é a resistência de polarização. Esta técnica baseia-se na determinação do declive da curva de polarização, que relaciona o Potencial Elétrico (E) da armadura e a Intensidade de Polarização (I_E), sendo este gráfico construído através da medição do Potencial da armadura em função de uma determinada corrente de Polarização, conforme a expressão seguinte.

$$R_p = \lim_{\Delta I \rightarrow 0} \frac{\Delta E}{\Delta I} \quad (31)$$

Na Figura 54 apresenta-se um dos gráficos obtidos, que relaciona estes parâmetros.

A resistência de polarização (R_p) relaciona-se com a velocidade de corrosão (I_{corr}), conforme a expressão:

$$R_p = \frac{\beta_a \beta_c}{2.3 A i_{corr} (\beta_a + \beta_c)} \quad (32)$$

sendo "A" a área da armadura e " β_a " e " β_c " os parâmetros de Tafel relativos aos processos anódico e catódico, respetivamente. Na tabela seguinte apresentam-se os parâmetros de Tafel em função do estado do processo corrosivo.

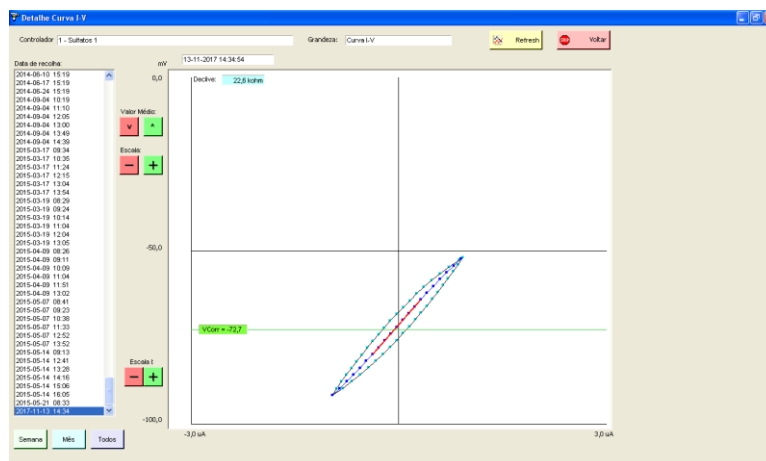


Figura 54 - Curva de polarização obtida pelo sistema Monicorr.

Tabela 16 - Parametros de Tafel em função do estado do processo corrosivo.

$(B_a B_c) / (2.3A(B_a + B_c))$	Estado do processo corrosivo
26 mV	Ativo
52 mV	Passivo

As sondas utilizadas na determinação da velocidade de corrosão das armaduras integradas no sistema de monitorização da corrosão Monicorr, são constituídas por um único bloco composto por dois pares de eléctrodos ou varões metálicos (um par em aço igual ao das armaduras e outro de aço inox, AISI 304), para além de um eléctrodo de referência (pseudorreferência de grafite) e na ponta uma ligação à armadura. Este conjunto permite determinar a velocidade de corrosão das armaduras, através da técnica da Resistência de Polarização Linear (LPR), a corrente galvânica entre os eléctrodos de aço macio e de aço inoxidável e a condutividade do betão em redor das armaduras. Na Figura 55 apresenta-se o sensor isolado e em fase de montagem para posterior betonagem. Na Figura 56 mostra-se o aspeto geral do sistema de medição e aquisição de dados deste sistema.



Figura 55 - Sensor do sistema Monicorr e sua instalação nos provetes de betão.

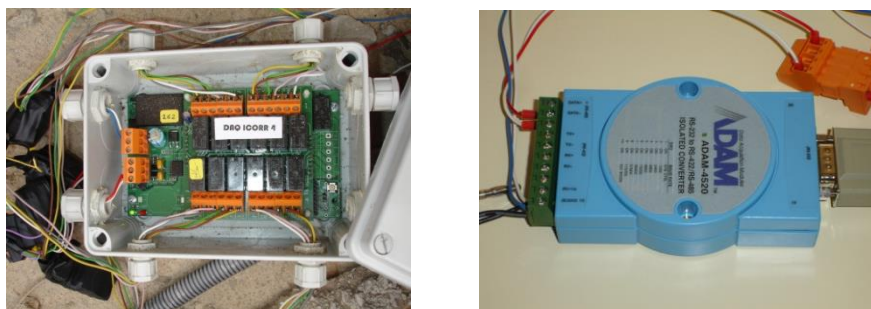


Figura 56 - Sistema de medição e aquisição de dados - Monicorr.

5.3.2. Determinação da resistividade iônica do betão - sistema Conducicorr

A condutividade iônica de um material está relacionada com o seu grau de contaminação iônica. Simultaneamente, a condutividade permite comparar níveis de porosidade entre dois materiais, na medida em que esta aumenta com a porosidade, pois esta torna mais fácil a movimentação dos iões no seio do material. No caso específico do betão, que é um material poroso, a condutividade depende da mobilidade e da concentração de iões existentes no seu interior. Este parâmetro é influenciado pelo tamanho e carga dos iões, temperatura, humidade no interior dos poros e grau de contaminação externa [142].

A condutividade iônica é, geralmente, determinada através da técnica dos quatro elétrodos ou da técnica dos dois elétrodos. No presente estudo foi utilizada a segunda técnica, para a determinação da resistividade do betão, utilizando um sistema designado por Conducicorr, que se baseia na técnica dos dois elétrodos, cuja instalação é efetuada à face do elemento de betão a monitorizar, sendo instalados com uma distância de 5 cm um do outro e que permitem determinar a resistividade do betão à profundidade de 1,5 cm e a 3,0 cm da superfície exposta, de acordo com a seguinte expressão:

$$\rho = R \frac{A}{L} \quad (33)$$

Para este efeito é criado um campo elétrico alternado (172 Hz) entre os elétrodos de aço inoxidável situados à mesma profundidade, impondo-se uma corrente e medindo-se a diferença de potencial alternada de resposta. Na figura seguinte apresentam-se este tipo de sensores.



Figura 57 - Sensor do sistema Conducicorr e sua instalação nos provetes de betão.

Este sistema também foi instalado nas instalações da ETAR de Portalegre. Por razões de ordem técnica e logística optou-se por efetuar a monitorização da estrutura em três pontos, dois dos quais localizados no recirculador de lamas e um na decantação secundária. A leitura da resistência e a aquisição de dados é efetuada através dos equipamento apresentados na Figura 58.

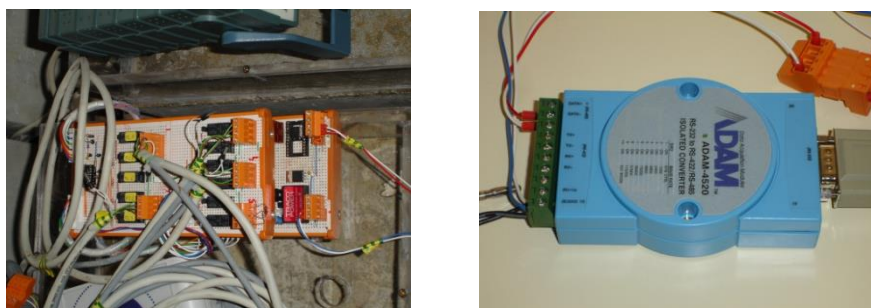


Figura 58 - Sistema de medição e aquisição de dados - Conducicorr.

5.4. Resumo da parte experimental

O trabalho desenvolvido pode ser subdividido em três fases parcialmente sobrepostas no tempo. Na primeira fase foi testado o comportamento do betão face à ação dos cloretos em laboratório. Na segunda fase estudou-se, em ambiente real, o efeito do efluente de uma ETAR sobre o betão. Na terceira fase, novamente em laboratório, acompanhou-se o processo degradativo do betão frente ao ataque por sulfatos.

Na primeira e terceira fase deste estudo os provetes de betão foram monitorizados com sondas embebidas (sistemas ConduitiCorr e MoniCorr) que permitiram medir a resistividade, potenciais e resistência de polarização ao longo do ensaio. Na fase inicial dos ensaios foi testada a resistência à compressão dos provetes cúbicos produzidos para o efeito. Paralelamente efetuaram-se recolhas de pó de betão para serem testadas no XRF de modo a acompanhar a progressão da contaminação do betão, em termos de penetração de cloretos e de sulfatos.

Na fase intermédia deste estudo, relativa à monitorização da ETAR, foi efetuada a monitorização da resistividade do betão em três zonas, no poço de bombagem, na caixa de recirculação de lamas e no decantador secundário. Numa fase já avançada do estudo foi efetuada a determinação da frente de carbonatação e da concentração de sulfatos. Na Tabela 17 apresenta-se um resumo da atividade desenvolvida.

Tabela 17 - Resumo das atividades desenvolvidas.

Exposição ambiental	Betões	Armaduras	Sistemas de monitorização	Ensaios
Cloretos (solução com 3% de NaCl)	12 provetes com 400 mm x 300 mm x 150 mm	Corrente, pintada e protegida catodicamente por galvanização e por corrente imposta	MoniCorr (Potenciais e resistência de polarização) ConduitiCorr (Resistividade)	Fluorescência de raios X (XRF) para determinar a concentração de cloretos Frente de carbonatação
	16 cubos com 150 mm de aresta	---	---	Resistência à compressão
Efluentes de ETAR	Parede do poço de bombagem	Corrente	ConduitiCorr (Resistividade)	Frente de carbonatação Concentração de sulfatos
	Parede da caixa de recirculação de lamas			
	Parede do decantador secundário			
Sulfatos (solução do 2,5% de Sulfato de Sódio e 2,5% de Sulfato de magnésio)	12 provetes com 400 mm x 300 mm x 150 mm	Corrente, pintada e protegida catodicamente por galvanização e por corrente imposta	MoniCorr (Potenciais e resistência de polarização) ConduitiCorr (Resistividade)	Fluorescência de raios X (XRF) para determinar a concentração de sulfatos
	12 cubos com 150 mm de aresta	---	---	Resistência à compressão

Capítulo VI

Monitorização da degradação de estruturas de betão armado em ambientes contendo iões cloreto

Este capítulo consiste no seguinte artigo:

Monitoring of the degradation of concrete structures in environments containing chloride ions
Pedro Romano, Paulo S.D. Brito and Luiz Rodrigues

Publicado na revista "Construction and Building Materials", 47 (2013), Pp 827-832,
<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.042>.

Resumo

O presente trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de uma metodologia de avaliação da degradação de estruturas de betão armado sujeitas a ambientes agressivos contendo iões cloreto com base na utilização de sistemas de monitorização com sondas instaladas permanentemente dentro das estruturas.

Foram realizados ensaios em provetes submetidos a meios controlados em laboratório. Foram efetuadas medidas da resistência de polarização, resistividade iónica do betão e potencial de corrosão a par de medidas de teor de cloretos dentro do betão.

A análise dos resultados com base no diagrama de Evans permite o desenvolvimento de um modelo suportado na monitorização simultânea ao longo do tempo do potencial de corrosão do aço da armadura e da sua resistência de polarização, permitindo a identificação das várias fases da degradação de estruturas de betão armado, em particular, da fase de iniciação do processo de degradação.

Palavras Chave: Monitorização, Betão, Proteção da Armadura, Cloretos

6.1. Introdução

A degradação de estruturas de betão armado sujeitas a atmosferas contendo iões cloreto, particularmente, em ambientes marítimos e sistemas de tratamento de águas e tratamento de águas residuais, levanta grandes problemas em termos económicos e ambientais. Efetivamente, a ação destes meios sobre estruturas de betão armado provoca, ao fim de algum tempo, sérios problemas de degradação que envolvem custos muito elevados em termos de reparação podendo nalgumas situações colocar em risco a estabilidade de partes da estrutura. Numa perspetiva de minimizar os custos de reparação, têm vindo a ser desenvolvidas e implementadas técnicas de monitorização em diversas estruturas em todo o mundo [10], [203], [133]. A monitorização da degradação deste tipo de estruturas permite fazer estimativas de velocidades de degradação e tempos de vida das estruturas, podendo assim garantir-se atempadamente intervenções de manutenção a custos significativamente mais baixos [134].

É geralmente aceite que a degradação de estruturas de betão armado por ação de iões cloreto resulta do facto de estes despoletarem um processo de corrosão do aço de reforço por picadas (*pitting*). O aço, dentro do betão, encontra um ambiente químico favorável à sua passivação, todavia os iões cloreto ao atingirem por difusão a armadura passiva, iniciam um processo de picada uma vez que tendem a romper de forma muito localizada o filme de passivação dando início à oxidação do ferro. Mediante o teor de água presente, a oxidação do metal pode conduzir à hidrólise dos iões ferro formados fazendo com que se verifique um aumento da acidez junto ao metal, o que impede a repassivação do aço. Depois, como os produtos da oxidação, essencialmente hidróxidos, precipitam com um volume superior ao ferro que lhe deu origem, provocam o surgimento de tensões internas no material, com fissuração que facilitam o contacto direto do ambiente [132], [204].

Este mecanismo de degradação só se torna visível quando numa fase de franca progressão surgem escorrências ferrosas nas superfícies externas das estruturas. Avaliar o estado de degradação de uma estrutura só quando ela já apresenta visivelmente este tipo de patologias, acarreta, normalmente, custos muito elevados para a reparação. Assim, para um dono de obra, existe todo o interesse de poder ter uma informação sobre os estados de iniciação dos processos de degradação na perspetiva de fazer intervenções de reparação a custos reduzidos. Assim, têm sido publicados vários trabalhos sobre a utilização de sistemas de monitorização que permitem obter, de uma forma continuada, informação sobre a cinética dos processos de degradação, com especial atenção às etapas de iniciação do processo de corrosão da armadura e à variação da corrosividade do betão ao longo do tempo [205], [206].

Várias técnicas que têm vindo a ser propostas e aplicadas neste tipo de monitorização, incluindo várias técnicas magnéticas, eletromagnéticas e eletroquímicas, nomeadamente, Radiografia de raios X, Tomografia Computadorizada, RADAR de penetração superficial, Perturbação do Campo Magnético, Ruído Eletroquímico, Resistência à Polarização Linear - LPR,

Espectroscopia de Impedância Eletroquímica - EIS, Espectroscopia de Impedância Eletroquímica Localizada - LEIS, Método do Pulso Galvanotático - GPM, Resistência Elétrica - BER, Mapeamento de Potencial Superficial, Resistividade do Betão e Correntes Galvânicas de Macro Células entre outras [133], [134], [132], [135]. Paralelamente a este tipo de técnicas mais específicas para a corrosão, outros parâmetros como a temperatura e a humidade relativa do betão podem também complementar a caracterização do processo corrosivo [134]. Todavia, têm sido as técnicas eletroquímicas que têm vindo a ter uma maior afirmação como técnicas de monitorização resultante do facto do seu relativo baixo custo de instalação e operação, bem como o facto de serem técnicas de natureza similar à do processo corrosivo, ou seja, processos eletroquímicos.

A maior parte dos trabalhos referentes a aplicação de sistemas de monitorização, não utiliza uma única técnica, mas sim combinações de várias técnicas de avaliação, aplicadas de um modo contínuo ou pontual recolhendo informação sobre as características do betão e o estado de corrosão da armadura. A combinação da determinação do potencial de corrosão da armadura, com base em técnicas de LPR ou de EIS, na perspetiva da determinação da velocidade de corrosão da armadura, e parâmetros sobre a corrosividade do betão, em particular, a sua resistividade, tem vindo a ser aplicadas [207].

O potencial de corrosão da armadura metálica é um potencial misto, resultado da conjugação da cinética de, pelo menos, dois processos: o processo anódico de oxidação do ferro e a redução, essencialmente, do oxigénio. A norma ASTM C-876, admite que o ferro se encontra numa situação de passivação, com uma probabilidade de 5% de ocorrência de corrosão, quando o potencial da armadura, determinado com o auxílio de um eléctrodo de referência de Cu/CuSO₄, se situa a valores superiores a -200 mV. Se o potencial se situa entre -350 mV e -200 mV, há uma probabilidade de ocorrência de corrosão da armadura de 50% e para valores inferiores a -350 mV a probabilidade de ocorrência de corrosão é da ordem dos 95%. [137].

Considerando que estamos na presença de um processo misto, a conjugação do valor do potencial de corrosão com a velocidade de corrosão da armadura permite uma avaliação mais concreta sobre os estágios iniciais do processo corrosivo. Das várias técnicas eletroquímicas que permitem o estudo cinético da corrosão, o método da Resistência de Polarização Linear é um dos métodos que mais tem vindo a ser aplicado devido à sua facilidade de interpretação e à sua elevada reprodutibilidade [142]. A resistência de polarização (R_p), que é inversamente proporcional à corrente de corrosão (i_{corr}), é definida pela Equação 34, através da curva de polarização resultado da corrente debitada, I_E , em torno do potencial de corrosão da armadura (E_{corr}):

$$R_p = \lim_{E \rightarrow E_{corr}} \frac{E - E_{corr}}{I_E} = \frac{\beta_a \beta_c}{2.3 A i_{corr} (\beta_a + \beta_c)} \quad (34)$$

onde A é a área local da armadura que está a ser inspecionada β_a e β_c são, respetivamente, os parâmetros de Tafel do processo anódico e do processo catódico. $\beta_a\beta_c/2,3/(\beta_a+\beta_b)$ varia entre 26 mV, para armaduras claramente ativas, e 52 mV, para armaduras passivas [204].

A resistividade iónica do betão tem vindo a ser utilizada para a determinação do nível de contaminação iónica do betão, nomeadamente, iões cloreto [208]. A resistividade iónica de um betão poroso depende, em primeiro lugar, da mobilidade e concentração de iões “livres”, transportadores de corrente, na solução que preenche a porosidade. A mobilidade iónica é uma característica intrínseca de uma espécie química variando, somente, com a temperatura. Todavia, a concentração iónica “livre” depende do teor de humidade no interior dos poros, do grau de contaminação por agentes externos e do equilíbrio de solubilidade dos diferentes sais que se encontram no líquido aquoso que preenche os poros. É geralmente aceite que o betão com resistividades superiores a $20 \Omega \cdot \text{cm}$ impõe um risco muito baixo de corrosão das armaduras e que para valores menores que $5 \Omega \cdot \text{cm}$ esse risco é muito elevado o risco [208].

Neste trabalho pretende-se desenvolver uma forma de avaliação do risco de corrosão das armaduras das estruturas de betão armado submetidas a ambientes contendo altos níveis de cloretos, principalmente nas fases iniciais do processo, com base na análise simultânea da evolução ao longo do tempo das medidas de potencial e velocidade de corrosão da armadura e da resistividade iónica do betão, usando sensores instalados permanentemente na camada de recobrimento de provetes de teste contendo armaduras de reforço.

6.2. Fase Experimental

Foram realizados ensaios laboratoriais com três provetes de betão armado com a forma de paralelepípedos com as dimensões de $40 \times 30 \times 15 \text{ cm}^3$. Cada provete foi armado com uma malha constituída por três varões de aço corrugado de 10 mm de diâmetro, separados entre si de 10 cm e cruzada com outros 3 varões iguais e também espaçados de 10 cm, perfazendo uma área total $193,2 \text{ cm}^2$. A armadura foi colocada a meio do provete no sentido de garantir um recobrimento de 5 cm. Os provetes foram executados com betão C30/37 D16 XC3(P) Cl 0,2 S2 de dosagem prescrita de acordo com a Norma NPEN 206-1, com incorporação de um cimento CEM II/A-L 42,5 R, com uma dosagem de 340 kg/m^3 , e um plastificante, Chrysoplast 775, com uma dosagem de $3,4 \text{ kg/m}^3$. Os agregados utilizados foram, areia fina (302 kg/m^3), areia grossa (506 kg/m^3) e brita 1 (1016 kg/m^3). A água incorporada, 170 kg/m^3 , corresponde a uma relação A/C de 0,5. Após cura de 28 dias em atmosfera húmida e a 25°C , os provetes foram sujeitos a envelhecimento através de contacto direto com solução de cloreto de sódio a 3 % contida num recipiente construído com placas de poli-metaacrilato de metil (PMMA) e parafusos metálicos, com tampa, mas sem fundo, por cerca de 9000 horas.

Dois tipos de sondas foram inseridos no interior de cada provete, de forma a permitir a recolha de um conjunto de parâmetros eletroquímicos, nomeadamente, o potencial e a

velocidade de corrosão das armaduras e a condutividade iônica do betão a profundidade a que se encontrava a armadura.

As sondas do tipo MonlcorrPat.^{Pend.} (ver Figura 59) foram utilizadas na determinação da velocidade de corrosão das armaduras. Este conjunto permite determinar a (a) velocidade de corrosão das armaduras através da técnica LPR e (b) corrente galvânica entre os eléctrodos de aço macio e de aço inoxidável e a condutividade do betão em redor das armaduras. A medição da LPR foi efetuada fazendo variar a tensão em ± 10 mV em torno do potencial de corrosão com uma velocidade de varrimento de 0,1 mV/s. Para cada provete foi medida a resistividade a uma profundidade de 1,5 cm, através da imposição de um campo elétrico alternado (172 Hz) entre os eléctrodos de aço inoxidável situados à mesma profundidade.

A informação foi recolhida periodicamente com auxílio de sistemas digitais de controlo e aquisição de dados. Na Figura 59 são apresentadas as imagens fotográficas das sondas eletroquímicas utilizadas.

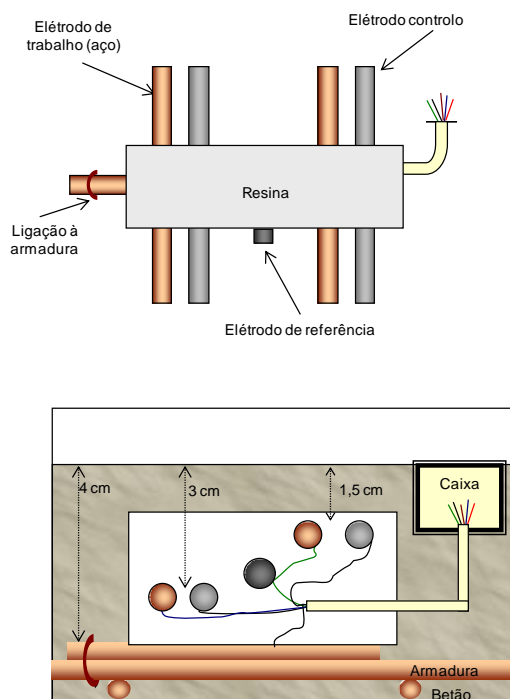


Figura 59 - Esquema representativo do sistema de monitorização MonlcorrPat.[®], usado nos ensaios. A determinação de perfis de concentração de cloretos foi feita com base na extração de pó de betão a diferentes profundidades na camada de recobrimento das armaduras, sendo o teor total em cloreto sido determinado por espectroscopia de fluorescência de raios X (XRF). Para a determinação do cloro livre e o do pH foi utilizado um procedimento de lixiviação com água destilada, colocando 5 g de amostra em 50 ml de água destilada num balão de decantação com tampa. Depois de um período de 5 min de agitação enérgica e de um repouso de 24 horas, a mistura foi filtrada e mediu-se finalmente valor de pH da solução. O bolo de filtração foi lavado várias vezes com água destilada e seco em estufa durante 24 horas a 100°C e, de novo,

foi determinado o seu teor em cloretos por XRF. Por diferença entre as duas determinações, obteve-se a percentagem de cloretos livres na massa original.



Figura 60 - Vista do posicionamento dos sistemas de monitorização Monlcorr e Conduclcorr antes da betonagem e após os 700 dias de ensaio.

6.3. Resultados e discussão

6.3.1. Processo de corrosão das armaduras

Nas Figura 61 a Figura 63 são apresentados os resultados obtidos com os provetes S1, S2 e S3 respeitantes às variações do potencial de corrosão (E_{corr}) e da resistência de polarização (R_p) do aço da armadura ao longo do tempo. A primeira observação genérica permite afirmar que o comportamento dos vários ensaios realizados nas mesmas condições, réplicas, é, sem dúvida, muito similar o que não é muito comum com provetes de betão armado, em função das heterogeneidades que este material apresenta, mesmo quando preparado com elevado controlo. O andamento das várias grandezas permite identificar claramente três fases: uma fase inicial, até cerca dos 200 dias, onde se verifica uma diminuição do potencial de corrosão e um aumento da resistência de polarização do aço, sinal de uma diminuição da velocidade de corrosão do mesmo. A partir dos 200 dias, nota-se uma tendência para a diminuição da resistência de polarização, a par da continuação da diminuição do potencial de corrosão. Por fim, uma terceira fase surge a partir dos 400 dias quando se constata uma drástica diminuição dos valores de ambos os parâmetros, indiciando uma despassivação do aço da armadura. Nesse período, parece também observar-se uma certa tendência para a ocorrência de processos de repassivação que se manifestam por aumentos simultâneos da resistência de polarização e do potencial de corrosão do aço. Resultados semelhantes foram obtidos por outros autores [10], [203], [133], [134].

Nos ensaios foram colocadas sondas de aço do mesmo tipo do das armaduras a diferentes profundidades da camada de recobrimento, nomeadamente a 1 e 3 cm. Na Figura 64 apresenta-se a variação temporal do E_{corr} para as diferentes sondas incorporadas no provete do ensaio S1. Verifica-se que o andamento das curvas é perfeitamente similar entre elas, registando apenas diferenças de tempo de início da fase de progressão generalizada do processo corrosivo. Como é evidente, as sondas colocadas a menores profundidades sofrerão

um ataque generalizado mais cedo do que as que se encontram a maior profundidade. Estes resultados mostram claramente que a colocação de sondas de forma escalonada na camada de recobrimento poderá ser uma boa estratégia de monitorização da degradação de estruturas em betão armado permitindo, ao mesmo tempo, adquirir informação cinética dos processos de transporte de agentes agressores [10].

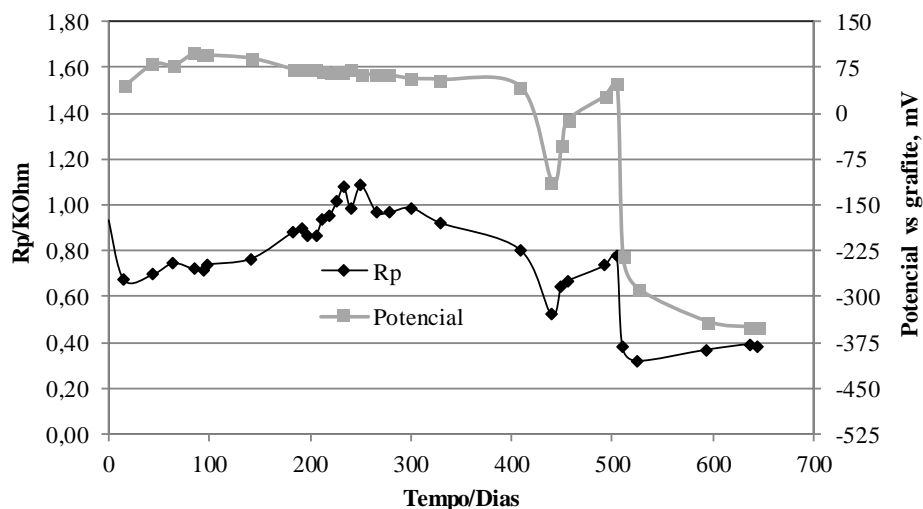


Figura 61 - Variação da Resistência de Polarização, R_p , e do Potencial de Corrosão da armadura do provete S1 durante a imersão em solução salina.

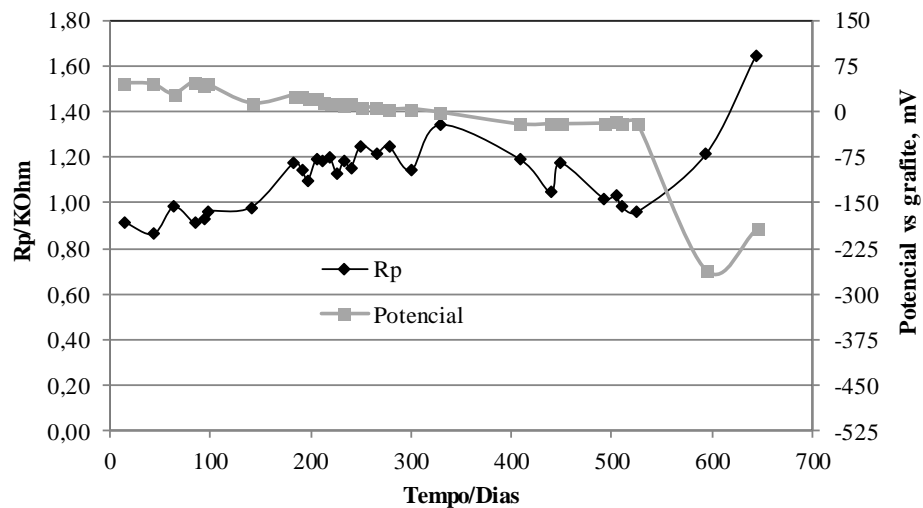


Figura 62 - Variação da Resistência de Polarização, R_p , e do Potencial de Corrosão da armadura do provete S2 durante a imersão em solução salina.

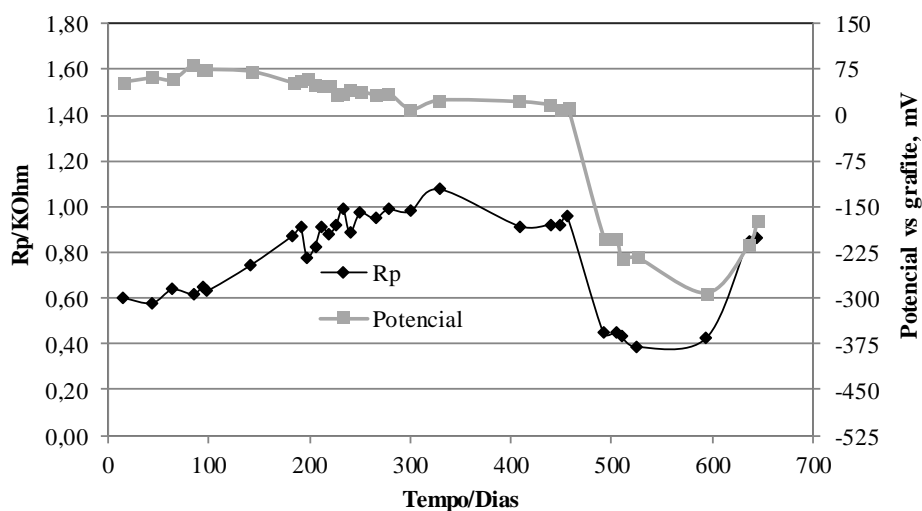


Figura 63 - Variação da Resistência de Polarização, R_p , e do Potencial de Corrosão da armadura do provete S3 durante a imersão em solução salina.

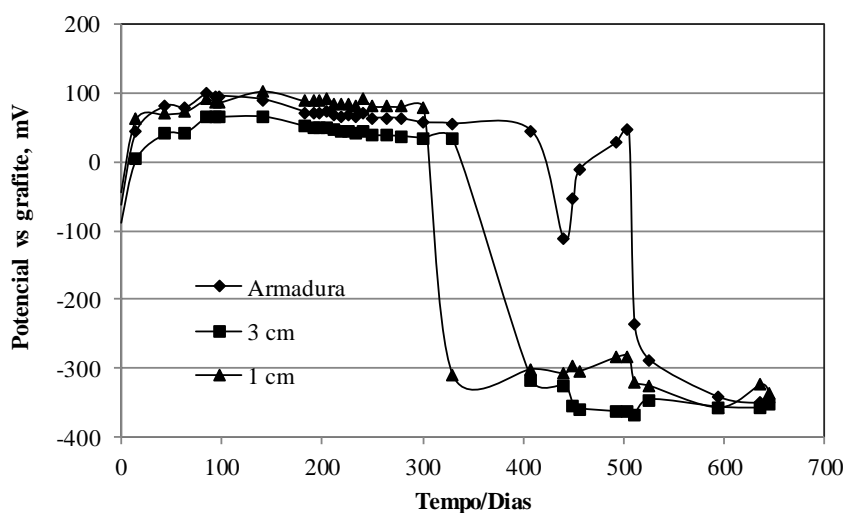


Figura 64 - Variação do Potencial da armadura inserida no provete S1 a diferentes profundidades, durante a imersão em solução salina.

Na perspectiva de obter resultados que permitam uma monitorização dos processos de degradação de estruturas de betão armado em meios salinos, interessa obter informação relacionada com a fase inicial do processo corrosivo por ação dos cloretos, ou seja, a fase de iniciação correspondente ao ataque por picadas [10]. Efetivamente, devido ao elevado valor de pH, cerca de 12,5, da solução contida nos poros do betão, as armaduras em aço encontram-se naturalmente passivadas. Todavia, a camada de passivação que protege o aço pode ser destruída por corrosão quando a concentração de iões cloretos nessa solução atinge um valor mínimo, o teor crítico de cloretos. A capacidade de detetar o momento do início da generalização da corrosão a toda a superfície do varão pode permitir, na prática, a implementação de ações corretivas, tais como, processos de extração eletrolítica ou mesmo reparações localizadas, a custos consideravelmente mais baixos do que os exigidos quando o

processo corrosivo está mais adiantado [204]. Tuutti [2] foi o primeiro a apresentar um modelo específico para descrever a corrosão de armaduras no interior do betão. O modelo contempla dois períodos distintos no progresso do processo corrosivo: a fase inicial, quando o betão sofre alterações químicas devido a infiltração de iões cloreto e carbonato e sua difusão até à superfície das armaduras, causando a despassivação do aço; e a fase de propagação que se estende desde o início da corrosão das armaduras até à interrupção do uso da obra por razões de segurança. Outros autores têm aplicado este modelo na procura de uma melhor caracterização da fase de propagação [2]. Os resultados obtidos no presente trabalho são consistentes com um modelo que apresenta o processo corrosivo compreendendo um período inicial de ativação das picadas, correspondente à segunda fase observada nos ensaios, e um período de corrosão generalizada correspondente à zona 3 dos gráficos E_{corr} x tempo como indicam as Figura 61 a Figura 63.

Na perspectiva de uma análise dos resultados baseada em diagramas de Evans, assumiu-se que o processo corrosivo resulta da conjugação da reação catódica de redução de oxigénio com a reação anódica de oxidação do ferro da armadura. Na Figura 65 a e b apresenta-se o processo de forma esquemática em diagramas de Evans. A fase inicial do processo de corrosão, quando se verifica uma diminuição do E_{corr} e aumento da R_p , pode ser explicada com base na assunção de que o processo catódico sofre uma polarização de concentração gradual, devido a uma crescente dificuldade de acesso de oxigénio à armadura relacionada com as transformações naturais de contração e diminuição de porosidade dos betões (conforme a Figura 65a). O oxigénio chega às armaduras através das paredes laterais e do fundo dos provetes que estão expostas ao ar ambiente. A partir do momento em que os iões cloreto começam a chegar à armadura em quantidades suficientes para dar início ao processo de corrosão por picadas (quando o teor crítico de cloretos é alcançado), ocorrerá uma despolarização progressiva do processo anódico com abaixamento do potencial de início de picadas, como se mostra na Figura 65b, o que conduz, como é evidente, a uma diminuição da R_p (aumento da velocidade de corrosão) e do E_{corr} .

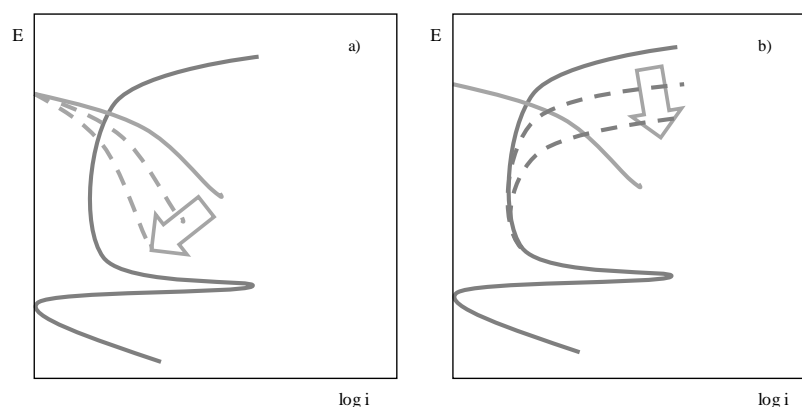


Figura 65 - Esquema do Diagrama de Evans representado o processo de corrosão na fase de iniciação (a) e durante a fase de propagação (b).

Tanto E_{corr} como R_p , revelam-se de grande utilidade para a monitorização da degradação de estruturas de betão armado sujeitas a ambientes salinos, verificando-se que existe uma relação estreita entre ambas as grandezas [206]. Tal relação permite identificar as diferenças entre as zonas de passivação e de corrosão numa representação do tipo E_{corr} versus R_p . Na Figura 66, onde se apresenta a relação entre os valores de E_{corr} e a R_p lidos para o mesmo tempo de ensaio das sondas de aço embebidas no provete S1. Neste gráfico é possível identificar uma zona de passividade, para valores elevados de E_{corr} e R_p , e outra de corrosão ativa, para baixos valores daqueles dois parâmetros. Todavia, e como já foi referido anteriormente, uma análise mais fina dos resultados obtidos parece mostrar que a monitorização do valor da R_p pode permitir, por si só, obter mais informação sobre todas as fases do processo, em especial, detetar a iniciação do processo de corrosão por picadas.

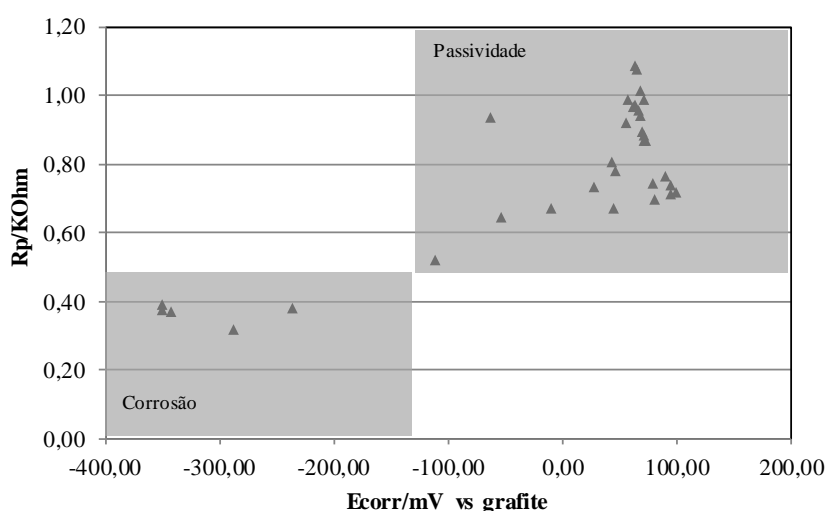


Figura 66 - Relação entre os valores da Resistência de Polarização Linear, R_p , e o Potencial de Corrosão da armadura do provete S1, medidos na fase final dos ensaios.

6.3.2. Penetração dos cloretos

Na Figura 67 apresenta-se a variação da resistividade do betão e da concentração de cloretos totais dentro do betão ao nível da armadura, ao longo do tempo para o provete S1. Verifica-se que a resistividade do betão vai diminuindo progressivamente, de forma quase linear, como resultado de um aumento progressivo da concentração de iões cloretos e de outros iões no interior do betão. Efetivamente, considerando que o teor de humidade é constante, dadas as condições de imersão em que o provete se encontra durante o ensaio, a diminuição da resistividade do betão deve ser atribuída ao aumento da concentração iónica, em primeiro lugar pela incorporação de iões cloreto e de sódio, no sentido de garantir a neutralidade elétrica dentro dos poros do material.

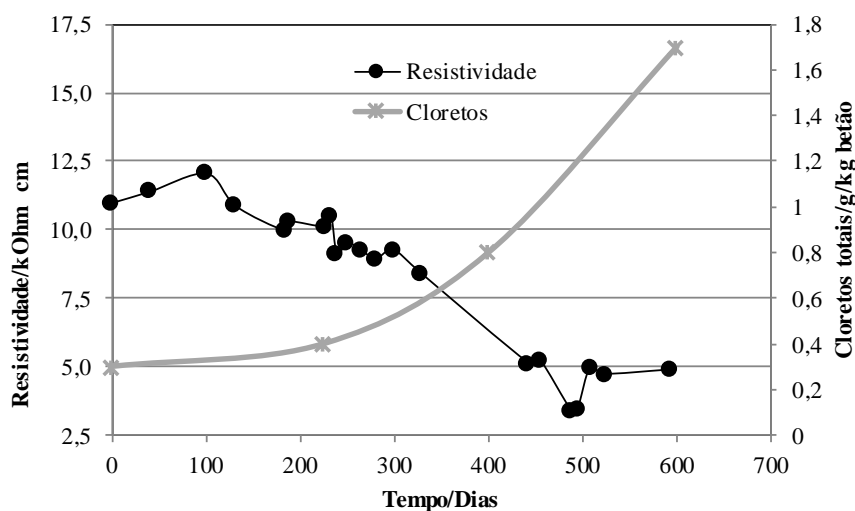


Figura 67 - Variação, ao longo do tempo, da resistividade do betão e do teor de cloretos ao nível da armadura instalada no provete S1.

Como já foi referido, sendo o teor crítico em cloretos responsável pela iniciação do processo corrosivo das armaduras no interior do betão, pretende-se utilizar, como é evidente, a concentração de cloretos como um dos parâmetros principais para a monitorização deste processo de degradação. Vários trabalhos [134] referem-se à grande dificuldade de conhecer o referido teor crítico de cloretos, uma vez que este parâmetro depende de muitos fatores operacionais, sendo difícil obter um valor padrão concreto, embora seja amplamente aceite o valor de cerca de 1 % em massa de cimento como valor de referência. Efetivamente, a concentração de cloretos crítica depende de fatores, tais como, condições da interface aço-betão e da própria superfície do aço, valor de pH da solução da porosidade do betão, potencial eletroquímico do aço, natureza do material ligante do betão, relação A/C, disponibilidade de oxigénio, temperatura e humidade no interior do betão, composição química do betão e seu nível de hidratação bem como a sua resistividade e ainda a fonte de cloretos e a natureza do catião [134]. Nas condições deste trabalho, e assumindo que o processo teve início entre os 250 e os 300 dias, determina-se que a concentração crítica situar-se-á em torno do valor de 0,6 g/kg (gramas de cloretos totais por kg de betão), muito abaixo do referido valor de referência.

Na Figura 68 apresenta-se a variação da R_p do aço da armadura com a variação da resistividade do betão ao longo do tempo de ensaio. A figura permite verificar que as fases do processo de degradação identificadas anteriormente, nomeadamente, iniciação do processo corrosivo por picadas e propagação de forma generalizada, coincidem grandemente com as gamas de resistividade, normalmente, aceites. Ou seja, quando a condutividade do betão cresce (valores de resistividade inferiores a 10 kΩ·cm) enceta-se a fase de iniciação da corrosão e quando a condutividade se torna muito elevada (valores de resistividade inferiores a 5 kΩ·cm) o aço entra numa fase de corrosão generalizada. Assim, os resultados obtidos validam claramente a utilização de valores da resistividade do betão para uma monitorização

do processo corrosivo de estruturas submersas ou estruturas onde se possa considerar que a humidade do betão dentro dos seus poros se apresenta constante e elevada ao longo do tempo.

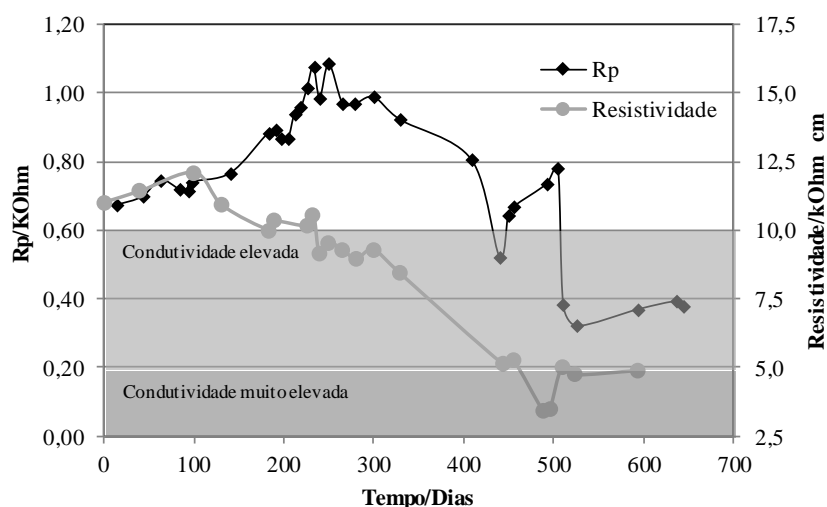


Figura 68 - Variação temporal da resistividade do betão e da resistência à polarização linear, R_p , do aço da armadura inserida no provete S1.

6.4. Conclusões

O presente trabalho permite retirar as seguintes conclusões:

- que a monitorização simultânea da variação, ao longo do tempo, do potencial de corrosão do aço da armadura e da sua resistência de polarização permitem perceber as várias fases da degradação de estruturas de betão armado, especialmente aquelas que ocorrem nas fases iniciais do processo corrosivo, muito relevante em contexto real;
- que a deteção da fase de iniciação do processo de degradação pode ser convenientemente conseguida com base na monitorização da resistência de polarização, ao longo do tempo, sendo que o processo se inicia quando começa a diminuição do valor da referida grandeza;
- que a monitorização da resistividade do betão permite igualmente um acompanhamento eficaz de todas as fases do processo de degradação de estruturas de betão armado, dado que a sua variação acompanha tanto o potencial como a resistência de polarização.

Financiamento

O trabalho foi financiado por RITECA, “Red de Investigación Transfronteriza de Extremadura, Centro y Alentejo”, (POCTEC - 0318_RITECA_4_E, 2008).

Capítulo VII

Influência da aplicação de revestimentos à armadura no comportamento de betão armado em ambientes salinos

Este capítulo consiste no seguinte artigo:

Influence of coatings on the behaviour of steel reinforced concrete in saline environments

Pedro Romano and Paulo S.D. Brito

Publicado em "Journal of Materials Sciences and Engineering with Advanced Technology", volume 10, número, 2014, Pp 77-91, ISSN 0976-1446.

Resumo

O presente trabalho tem como objetivo comparar o comportamento de três soluções de armaduras face ao comportamento do aço corrente em estruturas de betão sujeitas à ação de cloretos. Foram adotadas armaduras revestidas com tinta acrílica, armaduras galvanizadas e armaduras protegidas por corrente imposta.

Foram realizados ensaios em laboratório com provetes de betão monitorizados com sondas instaladas nos provetes, que permitem medir a resistência de polarização, o potencial de corrosão e a resistividade iónica do betão. Durante os ensaios foi determinado o teor em cloretos do betão.

Os resultados obtidos permitem identificar as diferentes fases de degradação das estruturas de betão armado sujeitas ao ataque por cloretos, nomeadamente à identificação da fase de iniciação do processo de corrosão das armaduras. Por outro lado, verificou-se que o revestimento da armadura com tinta acrílica retarda ligeiramente o início da corrosão desta, mas não impede a sua rápida disseminação. O aço galvanizado apresenta um bom comportamento a longo prazo e a proteção catódica atrasa a chegada dos iões cloreto à superfície da armadura.

Palavras Chave: Monitorização, Betão armado, Proteção da Armadura, Cloretos

7.1. Introdução

As estruturas de betão armado apresentam um forte impacto ambiental que resulta, essencialmente, da elevada quantidade de energia que é consumida na produção do cimento. Para a mitigação deste impacto são duas as abordagens que podem ser adotadas, a primeira consiste na alteração da quantidade e composição do ligante utilizado na fabricação do betão, a segunda será através do aumento da durabilidade das estruturas [50]. Sabendo-se que o desempenho do betão resulta de uma complexa interação de fatores, internos e externos, dos quais se podem destacar a sua constituição, nomeadamente no que se refere à quantidade e qualidade do ligante utilizado (cimento ou cimento e adições), a relação A/C, a espessura da camada de recobrimento, as condições de exposição ambiental, designadamente o tipo de agentes de degradação (carbono, cloretos, sulfatos) e a forma como interagem com o betão e a suscetibilidade das armaduras ao ataque dos agentes da degradação.

Dada a variedade dos processos e complexidade dos fatores que contribuem para desempenho do betão armado importa proceder à sua monitorização, designadamente no que se refere ao potencial e velocidade de corrosão das armaduras e à resistividade iónica do betão [170], [10], [133], e [203].

A durabilidade de uma estrutura está associada ao conceito de vida útil, que foi desenvolvido por Tuutti, e parte da definição do nível de degradação admissível de modo a determinar o limite aceitável para a vida da estrutura, ou seja, a vida útil, momento a partir do qual a estrutura já não desempenha as funções para as quais foi concebida de acordo com os requisitos de segurança definidos [2].

O conceito de vida útil de uma estrutura de betão armado engloba duas fases designadas por período de iniciação e período de propagação. O período de iniciação corresponde à penetração dos agentes da degradação do betão na camada de recobrimento até à envoltura das armaduras, criando as condições necessárias à sua despassivação, ou seja, à remoção da película passiva que protege o aço da corrosão. A destruição desta película pode ocorrer por efeitos da carbonatação, que conduz à redução do pH do betão envolvente à armadura para valores inferiores a 9, ou por concentração de cloretos acima de um determinado valor designado por teor crítico de cloretos. A fase da propagação é o período de tempo que medeia entre a despassivação das armaduras, que pode ser generalizada ou pontual em função do agente da degradação, e o limite de durabilidade estabelecido, que pode ser definido em função da perda de secção da armadura, associado a um determinado grau de corrosão das armaduras e degradação do betão. Na Figura 69 mostra-se modelo de Tuutti para a degradação do betão [72], [134].

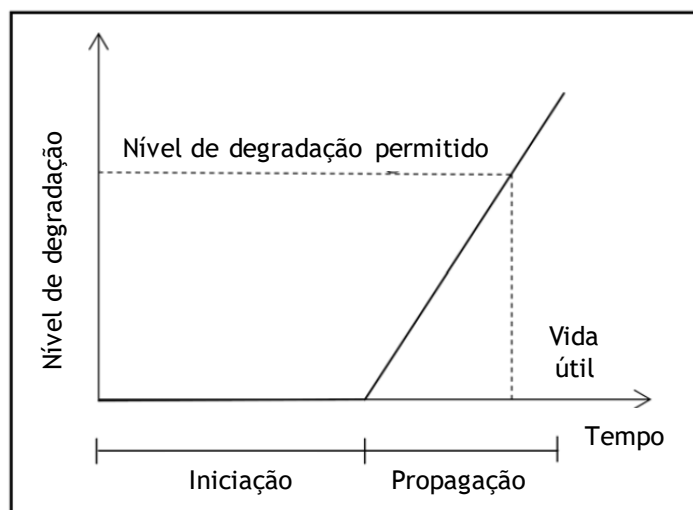


Figura 69 - Modelo de Tuutti para a degradação do betão armado, adaptado de [2].

A duração do período de propagação depende da suscetibilidade das armaduras aos agentes da degradação variando em função tipo de armaduras adotadas. A utilização de armaduras protegidas com inibidores de corrosão permitirá aumentar a vida útil das estruturas. Foram estudados quatro tipos de armaduras: aço macio, proteção catódica, armaduras galvanizadas e armaduras revestidas.

As armaduras de aço macio são as que maior expressão tem tido no setor da construção sendo o recurso mais barato. Apresentam um comportamento estável durante a fase de iniciação, enquanto o pH do betão se mantém a níveis superiores a 9, passando a ser muito vulneráveis aos agentes agressivos após a perda da película passiva de proteção, que ocorre quando os valores de pH são inferiores a 9.

A técnica da proteção catódica tem sido utilizada nas duas últimas décadas com sucesso em estruturas de betão armado expostas a ambientes muito agressivos. Esta técnica baseia-se na imposição de campo elétrico entre uma malha metálica superficial, que funciona como ânodo, e a armadura, que funciona como cátodo. O campo elétrico instalado polariza catodicamente a armadura e permite a diminuição da intensidade das reações anódicas à superfície da armadura e consequentemente a redução da corrosão [57].

As armaduras de aço galvanizado têm sido usadas em algumas construções relativamente recentes com o intuito de prolongar a vida útil das estruturas, apresentado um bom comportamento em situações onde o aço macio corrói devido ao ataque dos cloretos ou à carbonatação. Estas armaduras resultam do tratamento superficial das armaduras de aço macio através de um processo de imersão em zinco fundido ou por eletrólise. O diagrama de Pourbaix, apresentado na Figura 70, indica que o zinco é suscetível à corrosão quando o pH do meio envolvente é superior a 10,5. Deste processo resulta a formação de iões de hidrogénio zincato solúvel (HZnO_2^-) e, para valores de pH superiores a 13,1, o produto da corrosão é o peróxido de zinco solúvel (ZnO_2^{2+}). Em condições normais o betão possui um pH na faixa entre

12,5-13 e, apesar de a água nos poros do betão possuir geralmente um pH acima do que o zinco tolera, o comportamento das armaduras galvanizadas é normalmente bom [209].

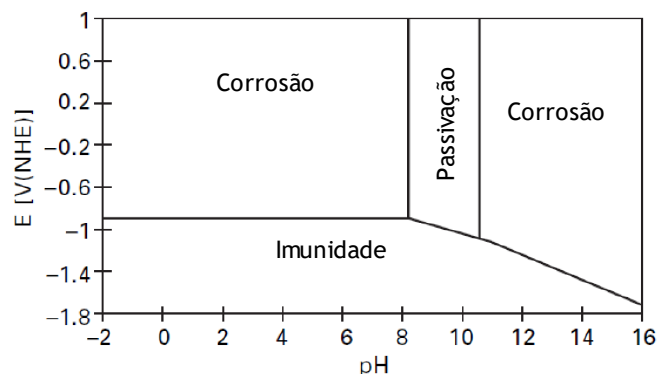


Figura 70 - Diagrama de Pourbaix para o zinco, adaptado de [10].

Armaduras revestidas a epóxi têm sido utilizadas nos últimos anos em construções marítimas, com o objetivo de aumentar o período de iniciação do processo de corrosão do aço das estruturas expostas a estes ambientes altamente agressivos. A sua utilização tem consequências ao nível da aderência entre o aço e o betão, existindo diversos estudos que apontam para a redução da tensão de aderência entre 15 a 50% [210]. Neste trabalho, recorreu-se a varões revestidos com tinta acrílica, sabendo de antemão que a sua utilização tem implicações na aderência entre o aço e o betão, com o intuito de compreender o impacto deste tipo de revestimento em termos de proteção contra a corrosão.

7.2. Fase Experimental

Os ensaios foram realizados em laboratório com recurso a quatro conjuntos de três provetes de betão armado com dimensões de $400 \times 300 \times 150 \text{ mm}^3$. Para cada conjunto de provetes adotou-se uma solução de armadura diferente, tendo os provetes designados por "S" armaduras correntes de aço macio, os provetes "R" armadura de aço revestida, os provetes "G" armadura de aço galvanizado e os provetes "P" armadura corrente com proteção catódica. Para todas as soluções de armaduras adotou-se uma malha ortogonal constituída por 3 varões de 10 mm de diâmetro afastados de cerca de 100 mm. Na execução dos provetes utilizou-se um betão de dosagem prescrita de acordo com a Norma NPEN 206-1, com incorporação de 340 kg/m^3 de cimento CEM II/A-L 42,5 R, $3,4 \text{ kg/m}^3$ de plastificante (Chrysoplast 775), 302 kg/m^3 de areia fina, 506 kg/m^3 de areia grossa e 1016 kg/m^3 de brita 1. Na produção do betão foi incorporado 170 kg/m^3 de água, corresponde a uma relação A/C de 0,5. Obteve-se um betão C30/37 D16 XC3(P) Cl 0,2 S2. Para a camada de recobrimento adotou-se uma espessura de 50 mm.

O betão foi sujeito a um processo de cura de 28 dias em atmosfera húmida e a uma temperatura de cerca de 25°C . Após a cura os provetes foram preparados para a imersão de

uma das faces em solução de cloreto de sódio a 3 % contida num recipiente plástico. Os provetes estiveram sujeitos à ação dos cloretos durante um período de cerca de 9000 horas.

Os provetes foram equipados com dois tipos de sondas de modo a permitir a recolha de informação relativa ao comportamento das armaduras, potencial e a velocidade de corrosão, e do betão, condutividade iónica e resistividade.

Para a determinação da velocidade de corrosão das armaduras utilizou-se o sistema de monitorização da corrosão Monlcorr Pat [189]. Estes elétrodo possuem um núcleo com a forma de um paralelepípedo de base quadrada com 2,5 cm de lado e uma altura de 8 cm, de onde saem dois pares de elétrodo ou varões metálicos (um par feito de aço macio semelhante ao das armaduras e outro de aço inox, AISI 304), para além de um elétrodo de referência (pseudorreferência de grafite) e um 5º cabo elétrico que permite a ligação direta à armadura. Este conjunto permite determinar a velocidade de corrosão das armaduras, através da técnica da Resistência de Polarização Linear (LPR), a corrente galvânica entre os elétrodo de aço macio e de aço inoxidável e a condutividade do betão em redor das armaduras [142].

A determinação da resistividade do betão foi obtida pela técnica dos dois elétrodo, com recuso a elétrodo cilíndricos com 3 cm de diâmetro e 4 cm de altura, colocados a uma distância de 5 cm um do outro e que permitem medir a resistividade do betão à profundidade de 1,5 cm da superfície exposta. Estes elétrodo criam um campo elétrico alternado (172 Hz) entre os anéis de aço inoxidável situados à mesma profundidade, impondo-se uma corrente e medindo-se a diferença de potencial alternada de resposta [194].

A recolha de informação foi processada por sistemas de aquisição de dados, que permitem comandar e recolher os dados das leituras periódicas efetuadas pelos sensores instalados.

7.3. Resultados e discussão

(a) Processo de corrosão da armadura

Na Figura 71 está apresentado a variação do potencial de corrosão (E_{corr}) e da resistência de polarização (R_p) do aço da armadura ao longo do tempo do ensaio em que a armadura não tinha qualquer tratamento superficial. O andamento das várias grandezas permite identificar claramente três fases. Uma fase inicial, até cerca dos 200 dias, onde se verifica uma diminuição do potencial de corrosão e um aumento da resistência de polarização do aço, sinal de uma diminuição da velocidade de corrosão do mesmo. A partir dos 200 dias, nota-se uma tendência para a diminuição da resistência de polarização, a par da continuação da diminuição do potencial de corrosão. Por fim, uma terceira fase surge a partir dos 400 dias quando se constata uma drástica diminuição dos valores de ambos os parâmetros, indiciando uma despassivação do aço da armadura. Nesse período, parece também observar-se uma

certa tendência para a ocorrência de processos de repassivação que se manifestam por aumentos simultâneos da resistência de polarização e do potencial de corrosão do aço.

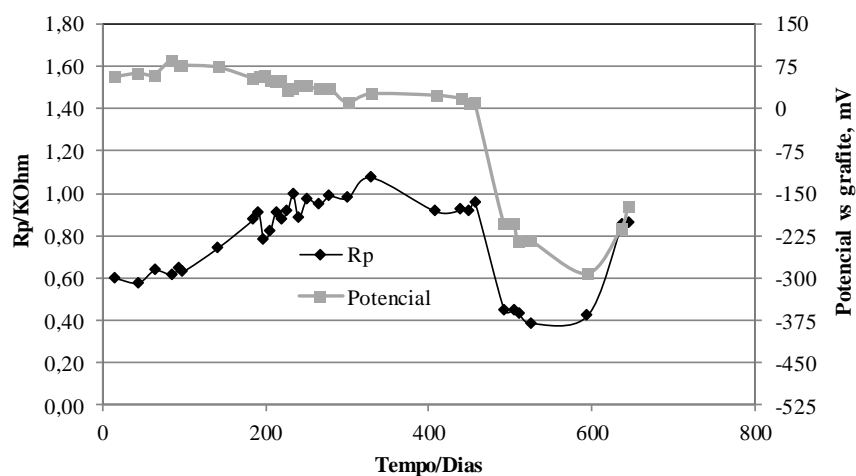


Figura 71 - Variação da Resistência de Polarização, R_p , e Potencial de Corrosão da armadura sem tratamento superficial durante a imersão em solução salina.

Na Figura 72 apresenta-se a variação da resistividade do betão e da concentração de cloretos totais dentro do betão ao nível da armadura, ao longo do tempo em que a armadura está sem qualquer tratamento superficial. Verifica-se que a resistividade do betão vai diminuindo progressivamente, de forma quase linear, como resultado de um aumento progressivo da concentração de iões cloretos e de outros iões no interior do betão. Efetivamente, considerando que o teor de humidade é constante, dadas as condições de imersão em que o provete se encontra durante o ensaio, a diminuição da resistividade do betão deve ser atribuída ao aumento da concentração iónica, em primeiro lugar pela incorporação de iões cloreto e de sódio, no sentido de garantir a neutralidade elétrica dentro dos poros do material.

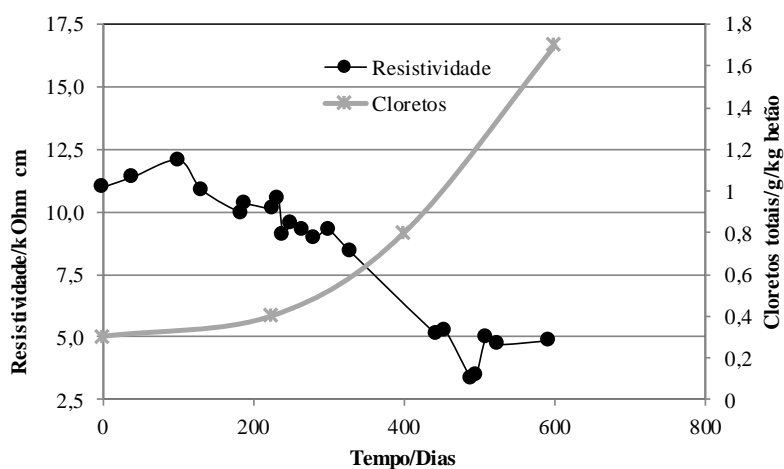


Figura 72 - Comportamento da resistividade do betão e da concentração de cloretos ao nível das armaduras instaladas no provete S1.

Relacionando as duas figuras pode verificar-se que as fases do processo de degradação identificadas anteriormente, nomeadamente, iniciação do processo corrosivo por picadas e propagação de forma generalizada, coincidem grandemente com as gamas de resistividade, normalmente, aceites. Ou seja, quando a condutividade do betão se torna elevada (valores de resistividade inferiores a $10 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$) enceta-se a fase de iniciação da corrosão e quando a condutividade se torna muito elevada (valores de resistividade inferiores a $5 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$) o aço entra numa fase de corrosão generalizada. Assim, os resultados obtidos validam claramente a utilização de valores da resistividade do betão para uma monitorização do processo corrosivo de estruturas submersas ou estruturas onde se possa considerar que a humidade do betão dentro dos seus poros se apresenta constante ao longo do tempo.

(b) Efeitos da aplicação do revestimento orgânico

Na Figura 73 está apresentada a variação do potencial de corrosão (E_{corr}) e da resistência de polarização (R_p) do aço da armadura ao longo do tempo do ensaio em que a armadura foi revestida com uma tinta acrílica. Em primeiro lugar, verifica-se que os andamentos das curvas seguem os andamentos verificados com os ensaios realizados com a armadura sem qualquer revestimento. Efetivamente, é notório a fase em que os iões cloreto chegam à superfície da armadura, cerca de 250 dias, e depois a fase de um aumento considerável da tendência generalizada de corrosão, após os 450 dias. Todavia, verifica-se que a resistência de polarização é, em todo o processo, cerca de uma ordem de grandeza superior, o que garante uma baixa velocidade de corrosão. Por outro lado, o potencial de armadura apresenta valores muito similares à armadura sem qualquer revestimento que nos leva a concluir que o ferro sofre todos os mesmos processos acabando também acaba por despassar.

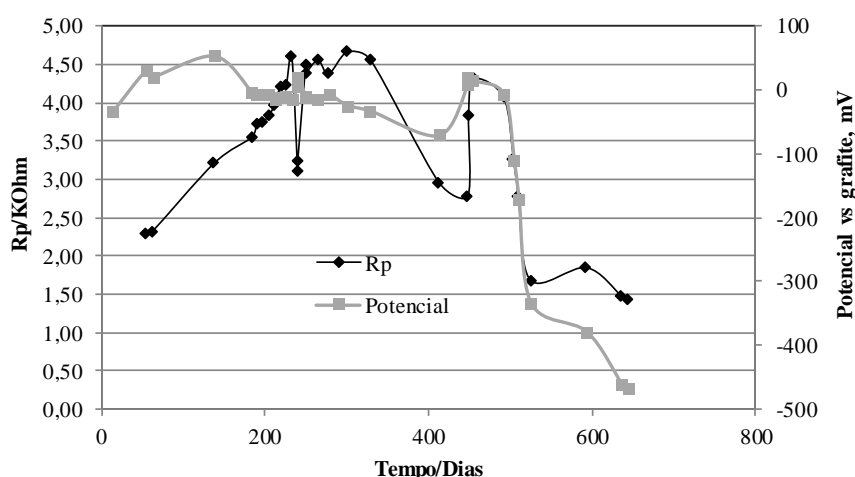


Figura 73 - Variação da Resistência de Polarização, R_p , e do Potencial de Corrosão da armadura pintada durante a imersão em solução salina.

O efeito do revestimento orgânico é um efeito de barreira dificultando o acesso dos iões agressivos (cloretos) à superfície do metal. Efetivamente, os resultados evidenciam esse

efeito e que se traduz num efeito positivo de garantir longevidade as estruturas. O revestimento é mais uma barreira a que os iões cheguem à superfície do metal.

Outro aspeto relevante que se pode extrair destes resultados, é que os sensores de monitorização com sondas revestidas continuam a permitir uma boa monitorização de todo o mecanismo de degradação.

(c) Efeitos da proteção catódica

A proteção catódica é uma das formas mais eficazes da proteção de estruturas metálicas submersas ou soterradas contra a corrosão. Do ponto de vista teórico o processo é muito simples de explicar, pois significa eliminar todas as áreas anódicas (onde ocorrem processos de degradação por oxidação) da estrutura a proteger, fazendo com que esta funcione, no seu todo, de forma catódica, isto como local de reações de redução evitando as reações de oxidação e a degradação do metal. Para tal, é necessário associar a estrutura a um ânodo externo que seja menos nobre, do ponto de vista eletroquímico, que o material da estrutura - proteção catódica por ânodos sacrificiais - funcionando assim a estrutura como um cátodo; ou a um ânodo inerte por onde escoará uma corrente catódica (que origine processos de redução do metal constituinte da estrutura) injetada (imposta) na estrutura a proteger - proteção catódica por corrente imposta - necessitando-se para isso de um gerador de corrente contínua, o que se concretiza de forma economicamente mais aceitável através de um sistema transformador/retificador. Também do ponto de vista termodinâmico/cinético a questão é fácil de entender, uma vez que se trata apenas de injetar uma corrente elétrica, de forma a forçar o equilíbrio de oxidação/redução do ferro no sentido da sua redução, i.e., tornando a reação de oxidação do ferro pouco extensa.

Na Figura 74 e Figura 75 estão apresentados as variações do potencial de corrosão (E_{corr}) e da resistência de polarização (R_p) do aço da armadura ao longo do tempo nos ensaios em que a armadura esteve protegida catodicamente: na Figura 74 por galvanização e na Figura 75 por corrente imposta.

No que respeita aos resultados da galvanização, verifica-se que a resistência de polarização e o potencial apresentam um comportamento relativamente próximo dos ensaios onde não foi utilizado qualquer revestimento na armadura, não se verificando, todavia, a rápida queda de potencial. Neste caso, o potencial e a diminuição da resistência de polarização acontece de forma gradual. Por outro lado, observa-se também que os potenciais são mais baixos, resultado óbvio de estarmos na presença de um revestimento de zinco, e que a resistência de polarização apresenta valores na mesma ordem de grandeza da armadura sem revestimento. Os resultados apontam claramente para um efeito positivo da galvanização considerando que o zinco está de facto a proteger o ferro. É evidente que esta proteção não será para sempre, ou seja, só terá efeito enquanto existir zinco, mas há claramente um aumento de longevidade da estrutura.

No caso da proteção catódica por corrente imposta (ver Figura 75), verifica-se que a resistência de polarização é baixa e que o potencial se mantém muito baixo, por imposição do retificador, garantindo-se que o metal está numa zona de imunidade. A baixa resistência de polarização não é devido à oxidação do ferro, mas sim a reações de redução, eventualmente da água, que geram íons hidroxilo. É interessante também notar que há um claro crescimento ao longo do tempo da própria resistência de polarização, sinal de um maior impedimento do processo.

Refira-se, também, que em ambos os casos com esta estratégia de monitorização, obtemos resultados efetivos que permitem um acompanhamento do fenómeno corrosivo apresentando claras potencialidades em termos de obras.

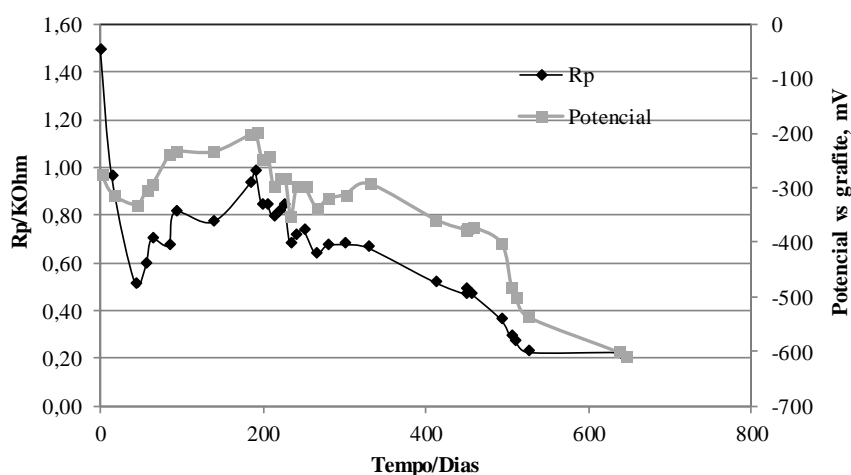


Figura 74 - Variação da Resistência de Polarização, R_p , e do Potencial de Corrosão da armadura galvanizada durante a imersão em solução salina.

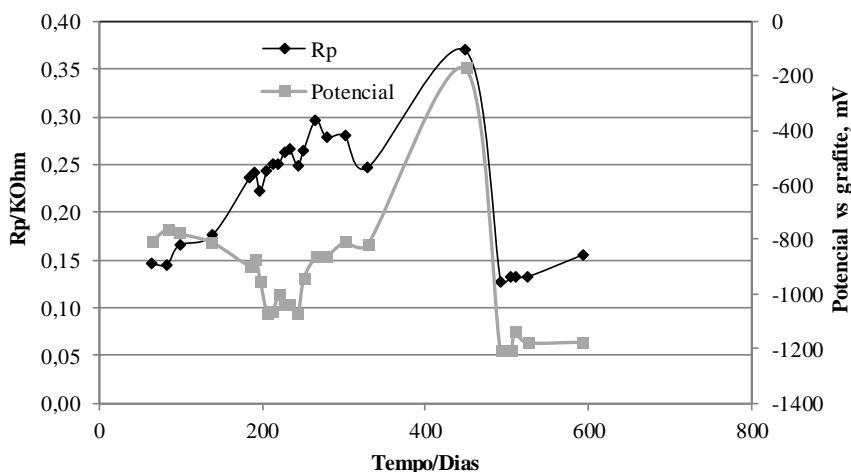


Figura 75 - Variação da Resistência de Polarização, R_p , e do Potencial de Corrosão da armadura protegida catodicamente durante a imersão em solução salina.



Figura 76 - Aço no fim dos ensaios: armadura sem proteção, armadura pintada, aço galvanizado e armadura protegida catodicamente.

7.4. Conclusões

O principal objetivo deste trabalho foi comparar o comportamento de diferentes soluções de proteção das armaduras face ao comportamento das armaduras correntes em ambientes salinos, com recurso a sistemas de monitorização. As principais conclusões obtidas nestes ensaios foram as seguintes:

- que o revestimento com tinta acrílica atrasa ligeiramente o início da corrosão das armaduras, mas não impede a sua rápida generalização;
- que as armaduras galvanizadas apresentam um bom comportamento a longo prazo, apresentando no fim dos ensaios corrosão pontual, enquanto a armadura corrente apresentava já corrosão generalizada;
- que a proteção catódica permite prolongar a vida útil das estruturas de betão expostas a ambientes salinos atrasando a chegada dos iões cloreto à face das armaduras;
- que a monitorização contínua das estruturas de betão armado, com a medição da variação do potencial de corrosão do aço da armadura, da sua resistência de polarização e da resistividade do betão, permite acompanhar as várias fases do processo de degradação do betão armado e identificar o início da fase relativa à corrosão das armaduras.

Agradecimento

O trabalho foi financiado por RITECA, “Red de Investigación Transfronteriza de Extremadura, Centro y Alentejo”, (POCTEC - 0318_RITECA_4_E, 2008).

Capítulo VIII

Avaliação de sistemas online de monitorização da degradação de estruturas de betão em ETAR's, sujeitas a ambientes de sulfatos, para inclusão em BIM-Manutenção

Este capítulo consiste no seguinte artigo:

Evaluation of online systems for monitoring the degradation of concrete structures in WWTPs, subject to sulfate environments, for inclusion in BIM-Maintenance

Pedro Romano and Paulo S.D. Brito

Submetido e aceite para comunicação oral no congresso EUROCORR 2019

Resumo

Neste trabalho apresentam-se os resultados da monitorização de estruturas de betão armado sujeitas ao ataque por sulfatos para fornecer informação para processo BIM - Manutenção. Foram efetuados ensaios a uma escala laboratorial e ensaios reais em vários equipamentos de ETAR. Os sistemas são constituídos por sondas colocadas no interior do betão e permitem efetuar medidas eletroquímicas, tais como, resistividade iónica do betão e potencial e corrente de corrosão das armaduras. Em complemento procedeu-se à medição do teor em sulfatos do betão ao longo do ensaio a várias profundidades. Foi possível identificar a existência de um mecanismo de bloqueio da progressão da penetração dos sulfatos em profundidade, confirmado pelos resultados da resistividade do betão e da resistência de polarização das armaduras. Os resultados permitem verificar que esta metodologia é válida para degradação de estruturas de betão armado sujeitas a ambientes com sulfatos dando informação relevante para processo BIM.

Palavras chave: Monitorização; betão armado; degradação; sulfatos

8.1. Introdução

As ETARs são estruturas que apresentam elevados problemas de degradação e necessidades de intervenções de manutenção resultado da elevada corrosividade dos efluentes quer em termos de degradação microbiológica quer em termos de ataques químicos, nomeadamente por sulfatos. O betão é suscetível de ser atacado por sulfatos, que podem ter origem interna (*ISA - Internal Sulfate Attack*) ou externa (*ESA - External Sulfate Attack*). Os sulfatos de origem interna são, geralmente, provenientes de agregados ricos em sulfatos, pelo que a escolha criteriosa dos agregados permite eliminar o problema. Quando a origem do ataque é externa a fonte dos sulfatos podem ser os solos ricos em sulfatos ou contaminados com sulfatos e as águas do mar ou contaminada com sulfatos [211], [91]. As águas residuais urbanas que são tratadas nas ETAR's enquadram-se nesta última situação.

A deterioração do betão devido aos sulfatos de origem externa é um complexo processo físico químico, que envolve reações químicas, transporte iónico, e degradação mecânica, fatores estes que interagem entre si, conduzindo à formação de cristais, tais como o gesso, a etringite, e a taumasite. O gesso resulta da reação entre os iões sulfato e o cálcio, que por sua vez reage com os aluminatos presentes no cimento originando a etringite. A taumasite tem origem na reação dos sulfatos com os silicatos cálcicos hidratados. Estas reações químicas, entre os iões sulfatos e os produtos da hidratação do cimento, são acompanhadas do crescimento dos produtos da reação. Este processo designa-se por ataque físico quando se produz a cristalização dos sais nos poros do betão [91], [96].

Existem dois mecanismos para explicar o processo de precipitação de etringite que conduz à sua expansão. O primeiro sugere que esta expansão resulta da produção de um volume adicional gerado pela própria formação da etringite. O segundo, atualmente com maior recetividade, relaciona as expansões com a pressão de cristalização exercida nas paredes dos poros devido à formação de etringite a partir de uma solução supersaturada em poros pequenos [93], [212], [213]. Em consequência da formação de etringite, desenvolvem-se tensões internas que conduzem à fendilhação, cujas consequências variam em função do tipo de cimento utilizado, tipo de catião sulfato e do tempo de exposição [214], [90].

Os efeitos do ataque por sulfatos pode ser medido através de diversos parâmetros, designadamente a variação do comprimento, perda ou aumento de peso, dureza superficial ou redução de resistência e do módulo de elasticidade [95], [215]. O problema destes indicadores é que não podem ser utilizados em estruturas em funcionamento. Nos últimos anos tem-se procurado utilizar medidas eletroquímicas para acompanhar o desenvolvimento dos processos degradativos resultantes do ataque por sulfatos. Entre os métodos utilizados encontram-se a medição da impedância, ruído eletroquímico, resistência de polarização ou resistividade iónica do betão [95], [216].

O mecanismo de progressão do processo de degradação da estrutura, seja um ataque de sulfatos químico ou físico, passa pela formação de estruturas cristalinas ou hidratadas que aumentam a tensão interior dos poros provocando fissuração e perda de betão de recobrimento. Quando este processo atinge a armadura, esta fica exposta ao ambiente agressivo iniciando um processo de corrosão mais ou menos generalizado do ferro por perda de passividade. Assim, a medição de parâmetros eletroquímicos pode permitir obter informação sobre as diversas fases destes mecanismos. A medição da condutividade permite monitorizar o surgimento de fissuras, já que a condutividade iónica aumentará devido ao acesso direto do efluente ao interior da estrutura, e o potencial da armadura e a resistência de polarização, permitem detetar e monitorizar o início da corrosão da armadura.

Consequência última da ação dos sulfatos é a corrosão das armaduras nele inseridas, fenómeno que pode ser mitigado através da proteção das armaduras, com recurso a tratamentos superficiais ou sistemas de proteção por corrente impressa. O tratamento da superfície das armaduras com materiais inorgânicos, tais como os nitratos e o zinco que atrasam o desencadear de reações anódicas e catódicas respetivamente [58]. O uso de revestimentos orgânicos, que através da criação de uma barreira de proteção evitam as reações anódicas e catódicas, tais como os revestimentos acrílicos ou composto à base de resina epóxi tendem a retardar o fenómeno o aparecimento do fenómeno da corrosão [55].

Neste trabalho pretende-se analisar a possibilidade de se utilizar medidas eletroquímicas para monitorizar o processo de degradação de estruturas de betão armado sujeitas a ambientes com sulfatos no sentido de dar informação a sistemas BIM de manutenção. A adoção da metodologia BIM pelo setor da construção está a crescer em todo o mundo. Esta metodologia centrada na partilha de informação entre os diferentes intervenientes no processo construtivo, permitirá no futuro incrementar a produtividade do setor. Com a metodologia BIM pretende-se obter uma visão global das infraestruturas, criando uma base de informação que poderá ser utilizada ao longo do seu ciclo de vida, mas que impõe alterações na forma como estes são concebidos, construídos e geridos. A metodologia BIM tem por suporte a modelação 3D das estruturas e uma base de dados que incorpora informação sobre as diversas características dos diferentes materiais utilizados. Após a conclusão da obra a informação produzida fica disponível para o dono de obra no sentido de ter uma ferramenta que o ajude a efetuar a gestão da manutenção da mesma (7ª dimensão do BIM), nomeadamente, em termos de programação de intervenções durante a vida da estrutura.

Todavia, para que os sistemas BIM possam contribuir de uma forma válida durante todo o tempo de vida da estrutura em termos de gestão da manutenção é necessário que haja instrumentação que permita monitorizar e dar informação sobre o estado de degradação dos diferentes materiais no sentido de suportar as decisões de manutenção e de posterior quantificação dos resíduos que serão gerados. Por outro lado, numa perspetiva económica as decisões de reparação envolvem custos que a metodologia BIM pode ajudar a minimizar quer

por permitir uma programação atempada quer pela valorização dos resíduos gerados. Neste trabalho a monitorização foi feita com recurso a sondas embebidas que permitem uma leitura contínua de parâmetros eletroquímicos, tais como, a resistividade do betão, potencial e velocidade de corrosão das armaduras e resistência de polarização linear, que também são úteis na monitorização de estruturas sujeitas a cloretos [170]. O funcionamento dos sistemas foi validado em ambiente laboratorial e numa ETAR em operação.

8.2. Parte Experimental

a) Sistema de monitorização

Os sistemas de monitorização utilizados são constituídos por sondas que são inseridas dentro das estruturas, tendo sido o seu desenho apresentado noutro trabalho [142], que permitem determinar a resistividade iónica do betão, o potencial e velocidade de corrosão da armadura.

A resistividade iónica do betão mede a maior ou menor capacidade que um betão tem para permitir o transporte de iões agressivos para o seu interior, função da porosidade. Este parâmetro apresenta uma grande variabilidade devido à heterogeneidade do próprio material, no entanto permite definir o risco de corrosão das armaduras.

A resistividade do betão pode ser medida através da utilização de eléctrodos inseridos no betão, conhecida pela técnica dos dois eléctrodos. O pressuposto desta técnica é a criação de um campo eléctrico alternado entre eléctrodos, podendo a resistividade ser medida a duas profundidades, através da criação de um campo eléctrico alternado entre os eléctrodos, em aço inox, à mesma profundidade, criando uma corrente e medindo a diferença de potencial. A fórmula seguinte traduz a relação entre a resistência medida pelos eléctrodos e a resistividade do betão [217]:

$$\rho = 2\pi aR \quad (35)$$

sendo "a" a distância entre eléctrodos.

Para betões expostos à ação dos cloretos existem limites comumente aceites que definem valores a partir dos quais ocorrem alterações significativas na porosidade do betão, que permitem uma maior condutividade iónica com consequências para a proteção das armaduras. Na Tabela 18 apresenta-se o risco de corrosão das armaduras em função dos valores da resistividade do betão exposto à ação de cloretos [11], [217].

Tabela 18 - Resistividade - risco de corrosão [11].

Resistividade (kOhm.cm)	Risco de corrosão
R > 20	Negligenciável
20 > R > 10	Baixo
10 > R > 5	Elevado
R < 5	Muito elevado

No caso específico do ataque por sulfatos as reações que ocorrem conduzem a uma redução da porosidade betão. Segundo Ikumi et al, a difusividade efetiva dos iões sulfato no betão reduz-se pela sua precipitação nos poros, bloqueando-os pela formação da etringite, reduzindo a mobilidade iónica e conduzindo ao aumento da resistividade [213]. Este processo tem um carácter cíclico, na medida em que a sua progressão envolve o transporte iónico e a degradação mecânica, fenómenos que interagem entre si. Deste modo a progressão dos iões sulfato para o interior do betão é um processo iterativo criando um padrão de múltiplas camadas, estando a camada exterior degradada e o interior dos elementos em bom estado [91].

A velocidade de corrosão das armaduras foi monitorizada através de um sistema de medição da corrosão constituído por dois pares de eléctrodos (um par de aço corrente como as armaduras e outro par de aço inox AISI 304), um eléctrodo de referência de grafite (pseudorreferência) e uma ligação à armadura. Este sensor permite medir a velocidade de corrosão das armaduras, através da técnica da Resistência de Polarização Linear (LPR) [142].

O potencial de corrosão mede a tendência que um metal tem para reagir com o meio envolvente ou eletrolítico. No caso do betão armado mede a possibilidade que a armadura inserida no betão tem para reagir. Na Tabela 19 apresenta-se uma relação entre o potencial de corrosão, E_{corr} , e o risco de corrosão associado [139].

Tabela 19 - Potencial - risco de corrosão [137].

Potencial de corrosão (mV)	Risco de corrosão
$E_{corr} > -200$	Baixo (inferior a 10%)
$-200 > E_{corr} > -350$	Intermédio
$E_{corr} < -350$	Alto (superior a 90%)
$E_{corr} < -500$	Corrosão severa

A técnica da resistência de polarização linear permite medir a taxa de corrosão das armaduras do betão, através da determinação da taxa de corrosão instantânea. Esta medida relaciona-se com a intensidade de corrente de corrosão (i_{corr}), conforme apresentado na equação seguinte [7], [189].

$$R_p = \frac{\beta_a \beta_c}{2,3 A i_{corr} (\beta_a + \beta_c)} \quad (36)$$

Na equação 2 a área da armadura é designada por A e β_a e β_c são os parâmetros Tafel relativos aos processos de corrosão anódicos e catódicos, respetivamente. A relação entre $\beta_a \beta_c / 2,3 / (\beta_a + \beta_c)$ varia entre 26 mV, quando o processo de corrosão das armaduras está ativo, e 52 mV, para armadura no estado passivo [9]. Na Tabela 20 apresenta-se o risco de corrosão das armaduras em função da intensidade de corrente de corrosão.

Tabela 20 - Risco de corrosão em função da intensidade de corrente de corrosão [5].

Corrente de corrosão (I_{corr})	Risco de corrosão
$I_{corr} < 0,1 \mu A/cm^2$	Negligenciável
$I_{corr} 0,1 - 0,5 \mu A/cm^2$	Baixo
$I_{corr} 0,5 - 1,0 \mu A/cm^2$	Elevado
$I_{corr} > 1,0 \mu A/cm^2$	Muito elevado

A resistência de polarização é determinada fazendo variar o potencial entre -10 e +10 mV, em torno do potencial de corrosão, medindo a intensidade de corrente que circula entre a armadura e o eletrodo auxiliar. Para impor um potencial constante é utilizado um potenciostato ligado a um eletrodo de referência estável que permite medir o potencial da armadura. A utilização deste método implica conhecer a área da secção de armadura que serve de base para a leitura da resistência da polarização. No presente caso, o sistema utiliza eletrodos de aço com 30 mm de comprimento e 6 mm de diâmetro.

b) Ensaios laboratoriais

Os ensaios, realizados em laboratório, decorreram ao longo de cerca de 25.000 horas (cerca de três anos), com recurso a quatro conjuntos de três provetes de betão armado, cada conjunto com o seu tipo de armadura, cujas dimensões são de $400 \times 300 \times 150 \text{ mm}^3$. Os provetes foram armados com uma malha constituída por três varões de aço nervurado de 10 mm de diâmetro, separados entre si de 100 mm e cruzada com outros três varões iguais e espaçados de 150 mm. A armadura foi colocada de forma a garantir uma camada de recobrimento de 50 mm. Utilizaram-se armaduras correntes sem tratamento, galvanizada, revestida com tinta acrílica e sujeitas a proteção catódica. Os provetes foram expostos ao ataque por sulfatos através do contacto direto com solução de sulfato de sódio (2,5%) e sulfato de magnésio (2,5%) contida num recipiente construído com placas de polimetacrilato de metil (PMMA) e parafusos metálicos, com tampa, mas sem fundo, conforme o provete apresentado na Figura 77.

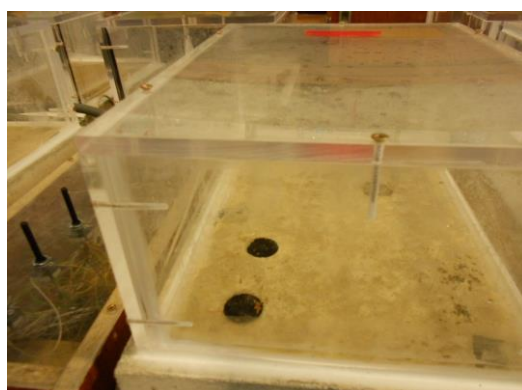


Figura 77 - Provetes de betão testado em laboratório.

Para a monitorização dos provetes recorreu-se aos dois tipos de sondas, embebidas no betão durante a betonagem, que permitem a medição da resistividade do betão, do potencial de

corrosão das armaduras e da resistência de polarização linear. Em paralelo com a monitorização eletroquímica foram retiradas amostras de pó de betão a diversas profundidades ao longo do estudo. Estas amostras foram caracterizadas por fluorescência de raios X, de modo a quantificar o nível de contaminação por sulfatos do betão da camada de recobrimento ao longo do ensaio.

c) Ensaio na estação de tratamento de águas residuais (ETAR)

A ETAR de Portalegre, cuja construção terminou no ano 2000, funciona de acordo com o princípio das lamas ativas, sendo constituída por vários órgãos entre os quais se destacam o Pré-tratamento, Reator Biológico, Recirculação de Lamas e Decantador Secundário, conforme pode ser observado através da Figura 78.

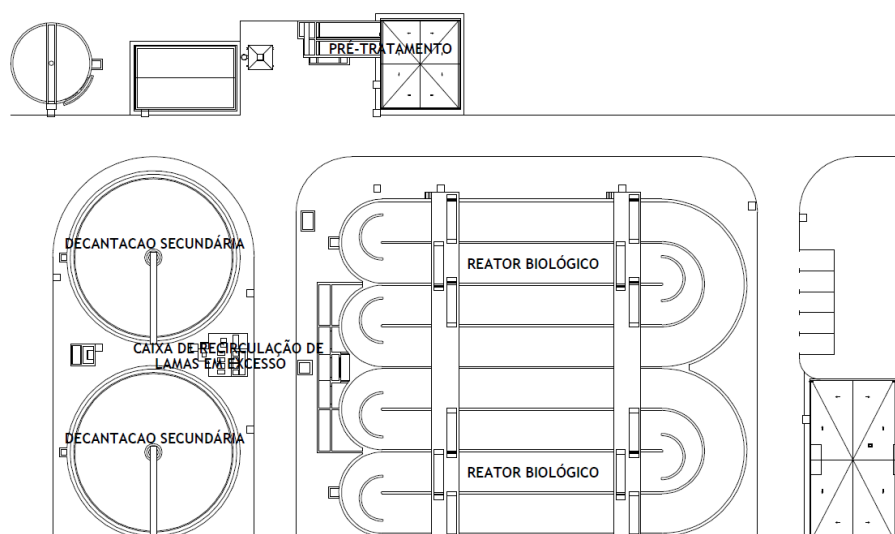


Figura 78 - Planta da ETAR de Portalegre.

Para os ensaios na ETAR recorreu-se à medição da resistividade iónica do betão. As sondas foram instaladas em três equipamentos da ETAR com ambientes diferentes. Para a instalação das sondas foram efetuadas perfurações nas paredes de betão existentes, de fora para dentro, com o diâmetro das sondas. Os furos efetuados foram posteriormente selados pelo exterior. O sistema 1 foi instalado no poço de bombagem, numa zona onde o betão está exposto a gases provenientes de lamas. O sistema 2 foi colocado numa das paredes da caixa de recirculação de lamas, estando este betão exposto ciclicamente às lamas provenientes do decantador secundário. A última sonda foi instalada no decantador secundário numa zona permanentemente submersa com águas já tratadas neste órgão. Na Figura 79 apresentam-se as localizações dos sensores.

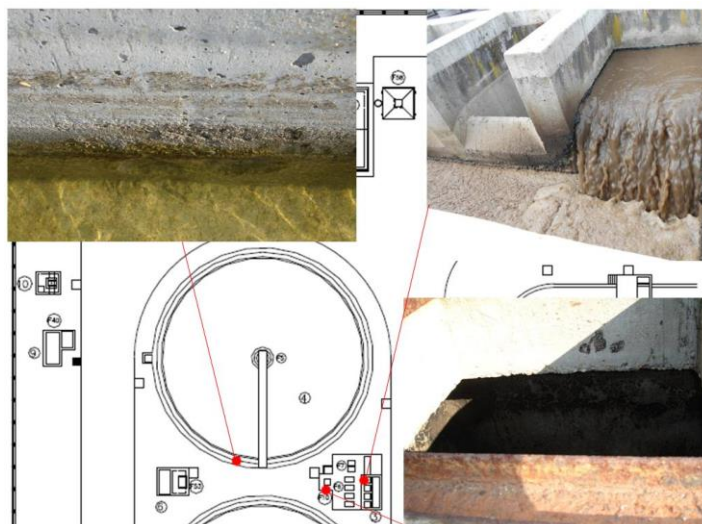


Figura 79 - Locais onde estão localizados os sensores.

Independentemente dos locais onde os sensores estão instalados, pode afirmar-se que estes elementos de betão armado estão sujeitos ao ataque químico do efluente da ETAR numa das suas faces. Deste modo o betão destes equipamentos enquadra-se, de acordo com a NP EN 206-1 [37], na classe de exposição ambiental XA, ou seja, betão sujeito a ataques químicos, sendo o grau de exposição variável em função da carga química do efluente na respetiva fase de tratamento.

8.3. Resultados e discussão

a) Provetes em laboratório

Na Figura 80 apresenta-se a variação do teor de sulfatos, em percentagem, por camada de 10 mm de espessura de betão de recobrimento, em função do tempo. A primeira observação é que ao longo de dois anos de ensaio só houve variação significativa da concentração de sulfatos na camada mais superficial dos provetes ensaiados. Nesta camada verificou-se um aumento da concentração de sulfatos no primeiro ano, havendo depois uma estabilização do seu teor. Nas camadas mais interiores os resultados evidenciam que não houve aumento do teor em sulfatos, o que indicia a existência de um mecanismo de bloqueio à penetração dos sulfatos. Este resultado é semelhante ao obtido por Sun et al. [212] que indica que é na camada superficial que se concentram os sulfatos, consequência da redução da sua difusividade efetiva no betão condicionada pela precipitação da etringite [213].

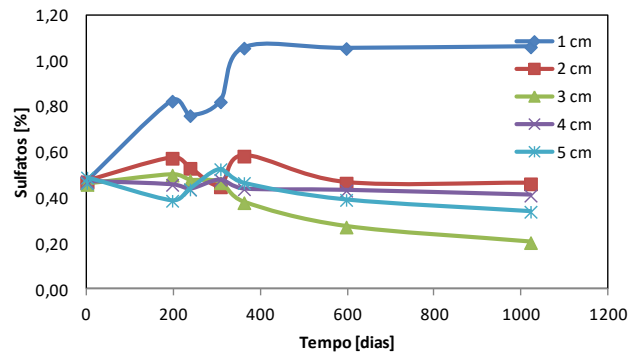


Figura 80 - Variação da concentração de sulfatos por profundidade ao longo do tempo.

Através da observação visual, ver figura 81, foi possível verificar que na camada superficial dos provetes, imersa em solução de sulfato de sódio e magnésio, a degradação se manifesta por descamação, fragmentação e amolecimento, conduzindo à redução da resistência superficial, fenómeno descrito por Ikumi et al. [91]. Todavia, e com base nos resultados já referidos, parece que é muito baixa a velocidade de difusão dos sulfatos, o que sugere que se terá desenvolvido um mecanismo de bloqueio que poderá ser consequência da formação de uma camada de hidróxido de magnésio (brucite), que na ausência de ações mecânicas se manteve intacta formando uma barreira, mecanismo descrito por Neville [218]. Em paralelo com este efeito, temos a formação de sulfato de cálcio hidratado (gesso), cujo processo poderá ter originado uma situação de equilíbrio químico por défice de fornecimento de sulfatos, cessando a progressão da penetração dos sulfatos. Estes efeitos podem ser observados na Figura 82, onde se apresenta uma camada translúcida de sais retirada da superfície exposta do betão e eflorescências ricas em sulfatos e cálcio nas faces laterais dos provetes.



Figura 81 - Camada superficial do provete 10 após o ensaio, antes e depois da remoção do betão solto.

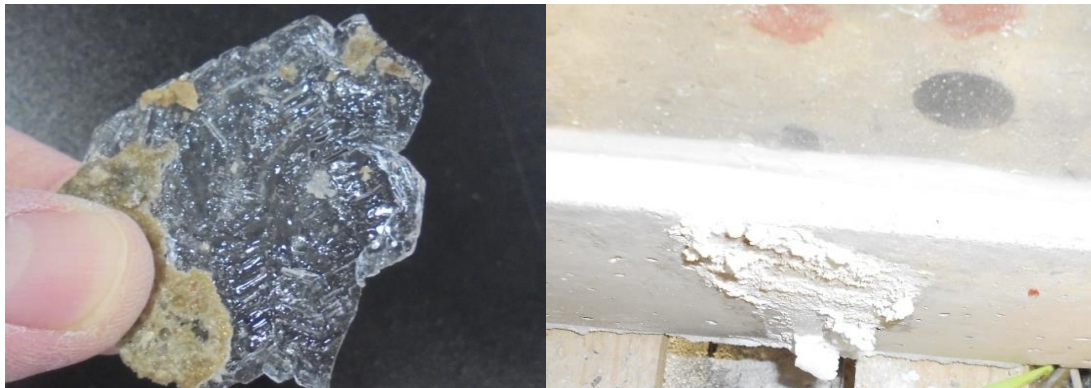


Figura 82 - Camada de hidróxido de magnésio (esquerda) e eflorescência de sais (direita).

A existência de uma barreira à progressão dos sulfatos pode ser confirmada pela análise da Figura 83 onde se apresenta a variação da resistividade de betão, ao longo do tempo de ensaio, a 10 e 30 mm de profundidade. Efetivamente, a resistividade do betão a 10 mm de profundidade, ao longo dos primeiros 400 dias apresenta um aumento gradual de intensidade, estabilizado a partir desta data. Em relação à camada de betão mais interior, a 30 mm de profundidade, pode observar-se que a resistividade aumenta ao longo do ensaio, apresentado valores nominais superiores. Um aumento da resistividade é um sinal da menor mobilidade iónica e de uma menor disponibilidade iónica, logo o seu aumento está associado a uma maior proteção das armaduras.

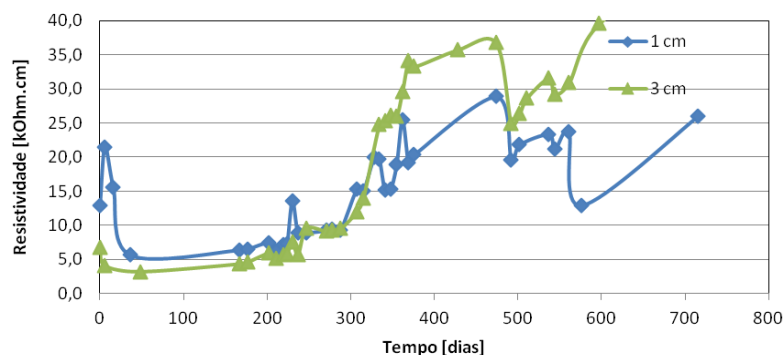


Figura 83 - Variação da resistividade de betão, ao longo do ensaio em dias, a 10 e a 30 mm de profundidade.

Os valores da variação da resistência de polarização e do potencial de corrosão das armaduras inseridas no betão ao longo do tempo está representado na Figura 84, onde são apresentados resultados da monitorização de provetes com armaduras galvanizadas, revestidas e sem proteção. Da análise da variação destes parâmetros verifica-se que o potencial de corrosão se mantém estável ao longo do ensaio, num nível que se pode associar a um risco baixo de corrosão. Destaca-se o potencial das armaduras galvanizadas que apresentam valores baixos, da ordem entre os -300 e os -200 mV vs. grafite, consequência da camada de zinco que envolve as armaduras que as torna mais eletronegativas. A variação da resistência de polarização das armaduras, ao longo do tempo, revela um aumento contínuo, o que indicia

um estado de passivação destas. Estes resultados, que mostram a inexistência de fenômenos de corrosão das armaduras, são consequência da existência de um mecanismo de bloqueio à penetração dos sulfatos no betão que mantém as armaduras protegidas.

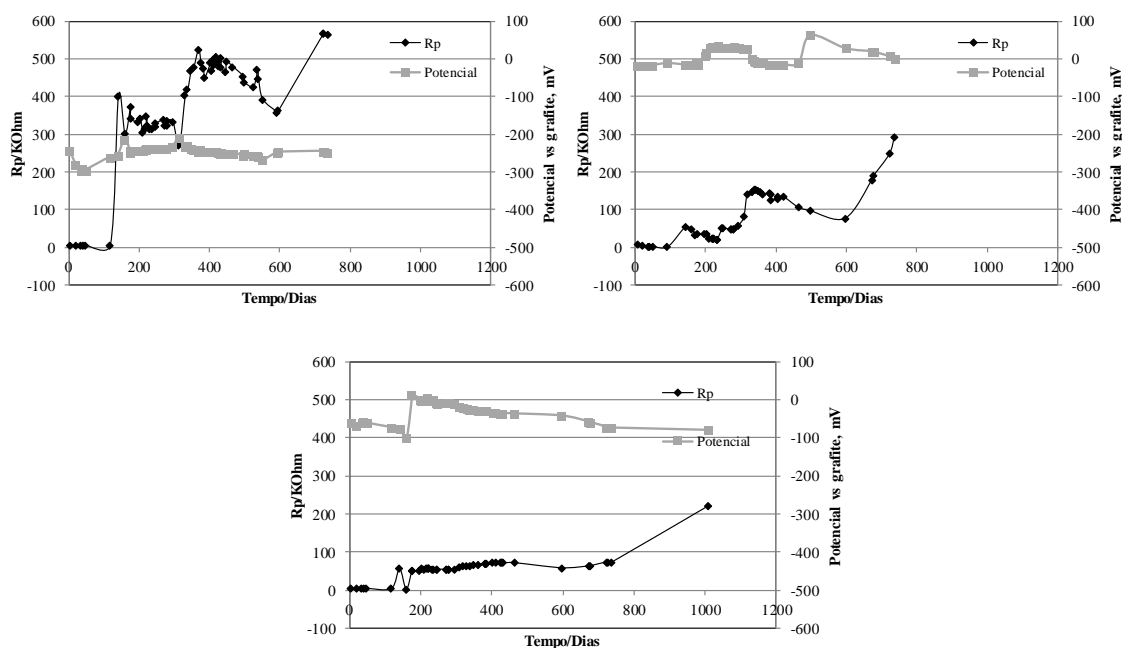


Figura 84 - Variação do potencial de corrosão e da resistência de polarização das armaduras galvanizadas, revestidas e sem proteção ao longo do tempo de ensaio.

Nas Figura 85 e Figura 86 compara-se o comportamento dos diferentes tipos de armaduras estudados. Nesta figura pode observar-se que a resistência de polarização da armadura galvanizada é maior, resultado da camada protetora de zinco. Em relação às restantes armaduras observa-se que possuem comportamentos muito similares, numa fase inicial até aos 600 dias, começando aí a aumentar a ritmos diferentes. Na mesma figura o segundo gráfico permite verificar que o potencial de corrosão das armaduras se manteve estável ao longo do ensaio, destacando-se o potencial da armadura galvanizada que apresenta um valor mais negativo, consequência da carga elétrica da camada de zinco, conforme já se referiu em paragrafo anterior.

Por outro lado, a formações do gesso e etringite sob a camada superficial do betão, também se traduz na formação de fissuras que podem permitir a rutura do betão. Tal situação tem sido reportada por outros autores [219], [89]. No presente caso verifica-se a degradação do betão superficial por descamação, conforme apresentado na Figura 81. Nestas situações, quando existem ações mecânicas que conduzam à remoção da camada degradada, o processo de degradação do betão sofre um rápido desenvolvimento. No presente estudo, devido à ausência de ações mecânicas que removessem a camada degradada, manteve-se o mecanismo de bloqueio já descrito anteriormente.

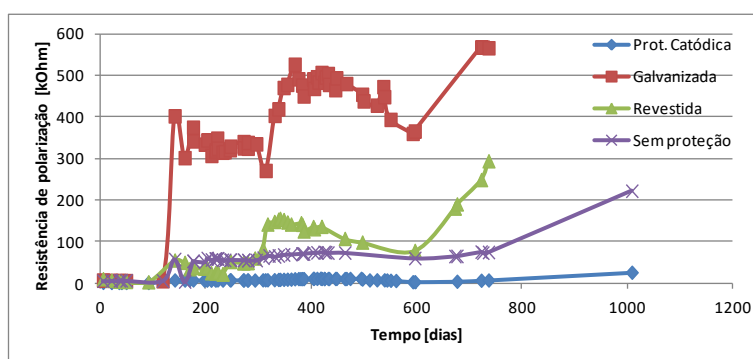


Figura 85 - Variação da resistência de polarização das armaduras protegidas catodicamente, galvanizadas, revestidas e sem proteção ao longo do ensaio

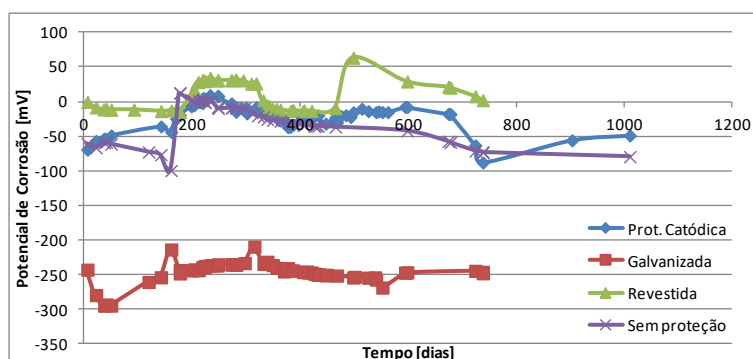


Figura 86 - Variação do potencial de corrosão das armaduras protegidas catodicamente, galvanizadas, revestidas e sem proteção ao longo do ensaio.

Da observação do gráfico da Figura 85, onde é apresentada a variação da resistência de polarização, verifica-se que, de facto, a resistência de polarização tende a aumentar a partir dos 600 dias. Esta situação é comum para estruturas que não estão sujeitas a ações agressivas de corrosão, já que a resistência de polarização tende a aumentar ao longo do tempo devido a fenómenos de consolidação da passividade do aço. Neste caso, tal situação verifica-se durante o período do ensaio, não sofrendo influência da frente de penetração de sulfatos. Este efeito também contribui para consolidar a ideia de que existe um bloqueio à penetração dos sulfatos, situação que tem efeitos positivos em termos de degradação do betão armado.

Na Figura 87 apresenta-se o potencial de corrosão de provetes com armaduras galvanizadas e sem proteção. Verifica-se que o potencial das armaduras galvanizadas apresenta pequenas variações ao longo do tempo, indicando a inexistência de processos de corrosão das armaduras. O gráfico relativo às armaduras sem proteção mostra que também estas apresentam um comportamento sem grandes variações ao longo do ensaio, especialmente as armaduras que se encontram a maior profundidade. A exceção é a armadura mais superficial que apresenta variações significativas ao longo do processo, provavelmente resultado de alguma instabilização produzida pela penetração de sulfatos nesta camada mais superficial,

conforme se mostra na Figura 80, mas mantendo-se numa gama de valores que corresponde a baixo risco de corrosão.

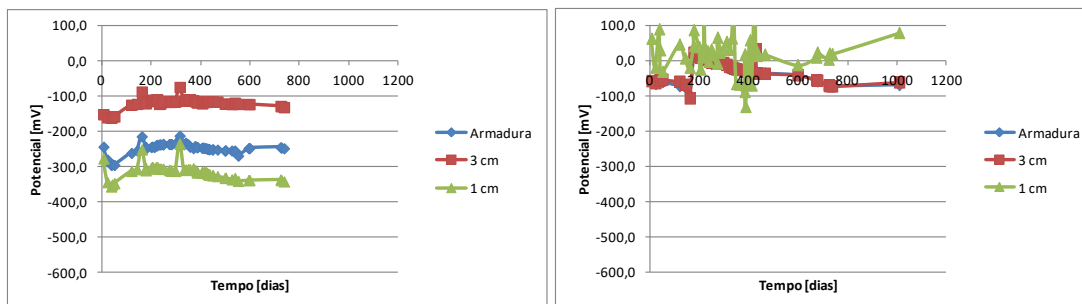


Figura 87 - Variação do potencial de corrosão nas diferentes camadas para as armaduras galvanizadas e sem proteção em função do tempo.

Após a conclusão dos ensaios procedeu-se à demolição de alguns dos provetes monitorizados para inspecionar o seu interior. Na Figura 88 são apresentadas as armaduras (uma galvanizada e outra revestida) extraídas dos provetes. Através da observação destas armaduras é possível confirmar o seu estado passivo, pois não existem sinais de corrosão.

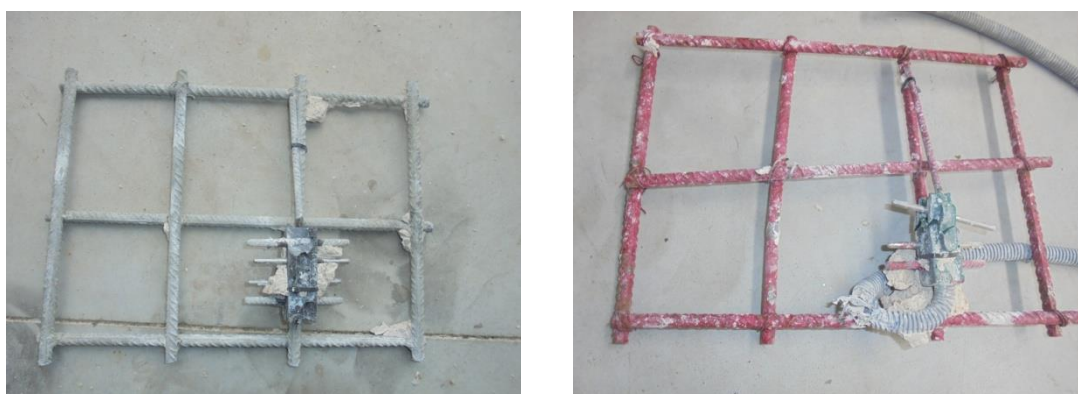


Figura 88 - Armaduras galvanizadas e revestidas removidas no fim dos ensaios.

b) Estação de tratamento de águas residuais

Nas figuras seguintes apresentam-se os resultados da monitorização da resistividade do betão em três zonas da ETAR de Portalegre, no poço e na caixa de recirculação de lamas e no decantador secundário. Pode observar-se que existe uma oscilação sazonal da resistividade que ocorre devido à variação da temperatura ao longo do ano [220], [138]. Apesar deste efeito, os resultados mostram uma prevalência de valores de resistividade baixos, indicando a existência de risco de corrosão das armaduras.

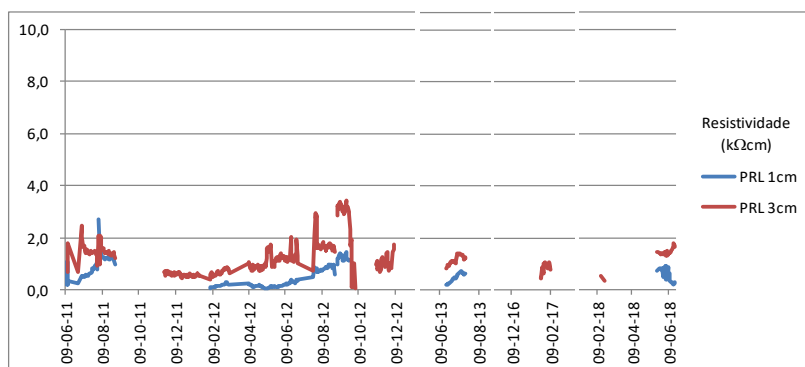


Figura 89 - Resistividade a 1 e 3 cm de profundidade - Poço de recirculação de lamas.

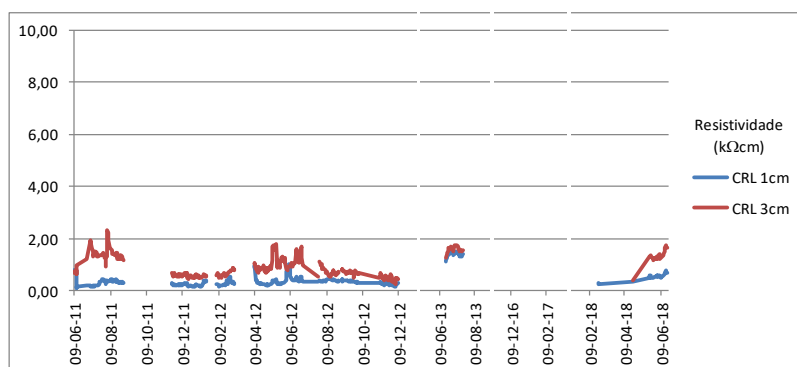


Figura 90 - Resistividade a 1 e 3 cm de profundidade - Caixa de recirculação de lamas.

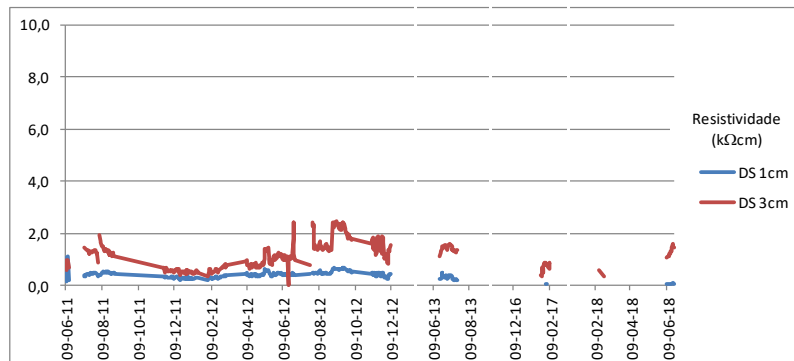


Figura 91 - Resistividade a 1 e 3 cm de profundidade - Decantador secundário.

Na Tabela 21 apresentam-se os resultados do teor em sulfatos. As análises efetuadas ao pó, extraído de carotes de betão retiradas de zonas próximas das sondas, mostram que é no interior do poço de recirculação de lamas que existe maior concentração de sulfatos.

No poço de recirculação de lamas, a conjugação da resistividade e da concentração de sulfatos indica a existência de um processo de degradação mais avançado, facto que pode ser constatado pela observação direta do estado do betão na face interior deste equipamento. Na Figura 92 pode observar-se que a face interior do betão, lado direito da foto, está em processo de degradação avançado.

Tabela 21 - Teor em sulfatos de três zonas da ETAR

	Local	Teor em sulfatos
Reator biológico	Face exterior	0,4%
	Zona intermédia	0,3%
	Face interior	0,3%
Poço de recirculação de lamas	Face exterior	0,4%
	Zona intermédia	0,5%
	Face interior	0,7%
Caixa de recirculação de lamas	Face exterior	0,4%
	Zona intermédia	0,4%
	Face interior	0,4%



Figura 92 - Carotes extraídos do poço de recirculação de lamas.

8.4. Conclusões

Com base nos resultados apresentados, relativos à monitorização de provetes de betão armado em laboratório e nas estruturas físicas da ETAR de Portalegre, pode concluir-se que:

- Os sulfatos, sendo iões que promovem a degradação do betão e em consequência a despassivação do aço, quando conjugados com os iões cálcio presentes no cimento, e na ausência de ações mecânicas que remova a superfície degradada, podem criar uma barreira que inibe a progressão da sua frente de ataque, como se verificou nos ensaios de laboratório;
- Os sistemas de monitorização instalado nos provetes do laboratório, que compreende a obtenção de medidas da resistividade do betão, do potencial e velocidade de corrosão do aço, permitem acompanhar o processo de degradação do betão exposto ao ataque por sulfatos, que numa fase inicial se reflete pelo aumento da resistividade do betão, indicando a existência de um mecanismo de bloqueio da condutividade iónica, informação esta que poderá ser útil para os responsáveis da manutenção de estruturas, pois a informação é compatível com a evolução e estabilização deste processo de degradação. Conjugando os resultados dos provetes de betão, em que a resistividade se encontra tipicamente em valores

superiores a 5 kOhm.cm a partir dos 300 dias, indicando uma baixa condutividade iónica do betão, e que o potencial de corrosão se situa em valores superiores a -200 mV vs. grafite, zona em que o aço se encontra no estado passivo, pode concluir-se que o sistema se encontra protegido;

- Os resultados da resistência de polarização, crescentes ao longo do tempo, indicam que a intensidade de corrente de corrosão tende para valores baixos, mostrando que os riscos de corrosão das armaduras são negligenciáveis, o que foi comprovado no fim dos ensaios através da observação das armaduras;

- O cruzamento da informação obtida através da observação visual da camada superficial do betão, das amostras de betão recolhidas, dos sistemas de monitorização, que envolveram a monitorização da resistividade, do potencial de corrosão e da resistência de polarização, permitem determinar o risco de corrosão das armaduras inseridas no betão;

- Na ETAR os resultados obtidos indicam que nas estruturas analisadas, em especial no interior do poço de recirculação de lamas onde a concentração de sulfatos no betão é maior, poderão estar criadas as condições necessárias para o desenvolvimento de fenómenos de corrosão das armaduras;

- Os sensores instalados, tanto em laboratório como na ETAR, mantiveram-se operacionais ao longo de todo o ensaio, o que mostra a sua robustez e capacidade para acompanhar a evolução ao longo do ciclo de vida das estruturas de betão armado, podendo contribuir para dar informações úteis para os processos de manutenção, quando enquadrados num sistema que permita a gestão da informação recolhida.

Capítulo IX

Conclusões e trabalho futuro

Neste capítulo apresentam-se as principais conclusões obtidas através do trabalho de investigação que serviu de suporte à presente tese e são indicadas direções para trabalhos futuros.

9.1. Principais conclusões

A digitalização e a automação conduzirão o setor da construção para um novo patamar de eficiência, eliminando fatores não fundamentais. Na área da manutenção dos edifícios será a metodologia BIM o elemento charneira deste processo de desenvolvimento, através da qual será possível integrar de forma progressiva novas ferramentas de trabalho. Esta integração terá um impacto muito grande nos custos de gestão das instalações, que correspondem a mais de 65% dos custos de operação do edifício.

A implementação de sistemas de gestão da manutenção, com recurso a sensores de monitorização do betão armado, integrado no processo BIM, envolve a utilização de modelos 3D, sistemas de monitorização e a respetiva interface de interligação. Destes três componentes, o desenvolvimento da interface envolve custos relativamente baixos quando comparado com os custos da produção dos modelos BIM e da instalação do sistema de monitorização. Este processo terá um forte impacto na redução do tempo gasto à procura de informação para a implementação de tarefas de manutenção.

Do ponto de vista da adequação dos sistemas para a sua integração em BIM podem destacar-se, pela experiência de utilização e pela fiabilidade de utilização, a monitorização do potencial de corrosão, da resistividade iónica do betão e a resistência de polarização. Estas técnicas eletroquímicas, juntamente com as soluções de fibra ótica são técnicas que dão garantias de funcionamento aos sistemas.

Para a manutenção, a existência destes novos modelos de gestão da informação facilitará a introdução de sistemas de monitorização automatizados, fomentando a utilização de sensores, resultado do aumento da capacidade de acomodar e organizar a informação recolhida. Em consequência, será possível adquirir e gerir um maior volume de informação, de forma contínua no tempo e sem intervenção humana. Este processo de automação tem interesse para todo o sistema de gestão dos edifícios, na medida em que permite gerir as variáveis ambientais (temperatura, humidade, renovação de ar) dos diferentes espaços, controlar o

funcionamento dos diversos equipamentos instalados ou medir e analisar indicadores relativos ao estado de conservação de elementos estruturais ou não estruturais.

Os sistemas de monitorização estrutural apresentados são suscetíveis de serem integrados como ferramentas de gestão da manutenção em modelos 3D. A sua incorporação na metodologia BIM, apresenta a vantagem adicional de permitir, de forma mais intuitiva, a interpretação dos resultados com recurso à localização espacial de cada um dos sensores. Os resultados da monitorização de construções em funcionamento demonstram o interesse dos dados obtidos para os processos de manutenção e realçam a necessidade da conjugação da leitura de dois ou mais parâmetros, de modo a garantir um elevado índice de fiabilidade do sistema.

Os donos de obra do futuro vão querer ter para as suas construções informação integrada, estruturada e facilmente acessível. Este desígnio só será alcançado com a utilização de plataformas integradoras de informação e sistemas.

No âmbito da monitorização de estruturas têm vindo a ser desenvolvidos e patenteados um vasto número de sistemas de monitorização da degradação de estruturas de betão armado que envolvem conjuntos de sondas e elétrodos, com diferentes arranjos, que permitem implementar várias técnicas eletroquímicas, tais como, resistência de polarização linear, espectroscopia de impedância eletroquímica, ruído eletroquímico, condutividade iónica, no sentido de obter informação sobre potenciais e velocidades de corrosão da armadura e velocidades de penetração de agentes agressores. Um conjunto muito significativo dos sistemas patenteados já apresentam ligações a sistemas eletrónicos dedicados para aquisição, processamento e envio dos resultados.

Neste trabalho, foi possível concluir que a monitorização simultânea da variação, ao longo do tempo, do potencial de corrosão do aço da armadura e da sua resistência de polarização permitem perceber as várias fases da degradação de estruturas de betão armado, especialmente aquelas que ocorrem nas fases iniciais do processo corrosivo, muito relevante em contexto real. Neste contexto, foi possível verificar que a deteção da fase de iniciação do processo de degradação pode ser identificada com base na monitorização da resistência de polarização, ao longo do tempo, sendo que o processo se inicia quando começa a diminuição do valor da referida grandeza. Em relação à resistividade do betão, esta permite igualmente um acompanhamento eficaz do processo de degradação de estruturas de betão armado, dado que a sua variação acompanha tanto o potencial como a resistência de polarização.

Comparando o comportamento de diferentes soluções de proteção das armaduras face ao comportamento das armaduras correntes em ambientes salinos, com recurso a sistemas de monitorização, foi possível concluir que o revestimento com tinta acrílica atrasa ligeiramente o início da corrosão das armaduras, mas não impede a sua rápida generalização, que as armaduras galvanizadas apresentam um bom comportamento a longo prazo, tendo no fim dos

ensaios sinais de corrosão pontual, enquanto a armadura corrente apresentava já corrosão generalizada. A proteção catódica permite prolongar a vida útil das estruturas de betão expostas a ambientes salinos atrasando a chegada dos iões cloretos à face das armaduras. Estes resultados mostram que a monitorização contínua das estruturas de betão armado, com a medição da variação do potencial de corrosão do aço da armadura, da sua resistência de polarização e da resistividade do betão, permite acompanhar as várias fases do processo de degradação do betão armado e identificar o início da fase relativa à corrosão das armaduras.

Com base nos resultados obtidos, relativos à monitorização de provetes de betão armado em laboratório e nas estruturas físicas da ETAR de Portalegre, pode concluir-se que os sulfatos, sendo iões que promovem a degradação do betão e em consequência a despassivação do aço, quando conjugados com os iões cálcio presentes no cimento, e na ausência de ações mecânicas que removam a superfície degradada, podem criar uma barreira que inibe a progressão da sua frente de ataque, como se verificou nos ensaios de laboratório. O recurso a sistemas de monitorização instalado nos provetes do laboratório, que compreende a obtenção de medidas da resistividade do betão, do potencial e velocidade de corrosão do aço, permitem acompanhar o processo de degradação do betão exposto ao ataque por sulfatos, que numa fase inicial se reflete pelo aumento da resistividade do betão, indicando a existência de um mecanismo de bloqueio da condutividade iónica, informação esta que poderá ser útil para os responsáveis da manutenção de estruturas, pois a informação é compatível com a evolução e estabilização deste processo de degradação. Conjugando os resultados dos provetes de betão, em que a resistividade se encontra tipicamente em valores superiores a 5 kOhm.cm a partir dos 300 dias, indicando uma baixa condutividade iónica do betão, e que o potencial de corrosão se situa em valores superiores a -200 mV vs. grafite, zona em que o aço se encontra no estado passivo, pode concluir-se que o sistema se encontra protegido.

Os resultados da resistência de polarização dos provetes, crescente ao longo do tempo, indicam que a intensidade de corrente de corrosão tende para valores baixos, mostrando que os riscos de corrosão das armaduras são negligenciáveis, o que foi comprovado no fim dos ensaios através da observação das armaduras. O cruzamento da informação obtida através da observação visual da camada superficial do betão, das amostras de betão recolhidas, dos sistemas de monitorização, que envolveram a monitorização da resistividade, do potencial de corrosão e da resistência de polarização, permitem determinar o risco de corrosão das armaduras inseridas no betão.

Na ETAR os resultados obtidos indicam que nas estruturas analisadas, em especial no interior do poço de recirculação de lamas, onde a concentração de sulfatos no betão é maior, poderão estar criadas as condições necessárias para o desenvolvimento de fenómenos de corrosão das armaduras.

Os sensores instalados, tanto em laboratório, com exposição à penetração de cloretos como ao ataque por sulfatos, assim como na ETAR, mantiveram-se operacionais ao longo de todos os ensaios, o que mostra a sua robustez e capacidade para acompanhar a evolução ao longo do ciclo de vida das estruturas de betão armado, podendo contribuir para a obtenção de informações úteis para os processos de manutenção, quando enquadrados num sistema que permita a gestão da informação recolhida.

9.2. Direções para trabalhos futuros

Os trabalhos a desenvolver no futuro terão como objetivo o aprofundamento da automatização da monitorização de estruturas de betão armado e o desenvolvimento de ferramentas de gestão da manutenção articuladas com os modelos BIM.

Em relação ao primeiro tópico, o objetivo será o desenvolvimento de sistemas mais autónomos, em termos de leituras de parâmetros eletroquímicos, com sistemas de alerta automático para situações em que se identifiquem anomalias de funcionamento ou em que os resultados das leituras se encontrem fora dos parâmetros previamente definidos.

O segundo ponto diz respeito à necessidade de desenvolver ferramentas de gestão da manutenção que incorporem a informação recolhida através dos sistemas de monitorização de modo a ser possível aceder de forma simples e intuitiva aos dados obtidos.

Bibliografia

- [1] O. E. Gjorv and S. P. Shah, "Testing methods for concrete durability," *Matériaux Constr.*, vol. 4, no. 5, pp. 295-304, 1971.
- [2] K. Tuutti, "Corrosion of steel in concrete," *CBI Rep. 482, Swedish Cem. Concrete Institute.*, p. 468, 1982.
- [3] J. Pommersheim and J. Clifton, "Prediction of concrete service-life," *Mater. Struct.*, vol. 18, pp. 21-30, 1985.
- [4] P. Schiessl and M. Raupach, "Monitoring of the corrosion risk for the reinforcement using corrosion cells." 1992.
- [5] C. Andrade and C. Alonso, "Corrosion rate monitoring in the laboratory and on-site," *Constr. Build. Mater.*, vol. 10, no. 5 SPEC. ISS., pp. 315-328, 1996.
- [6] S. Feliu, J. a. Gonzalez, and C. Andrade, "Multiple-electrode method for estimating the polarization resistance in large structures," *J. Appl. Electrochem.*, vol. 26, no. 3, p. 305, 1996.
- [7] D. W. Law, S. G. Millard, and J. H. Bungey, "Use of galvanostatic pulse measurements on active reinforcing steel in concrete to assess corrosion rates," *Br. Corros. J.*, vol. 36, No. 1, no. February, 2001.
- [8] M. F. Montemor *et al.*, "Multiprobe chloride sensor for in situ monitoring of reinforced concrete structures," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 28, pp. 233-236, 2006.
- [9] S. Dong, C. Lin, R. Hu, L. Li, and R. Du, "Effective monitoring of corrosion in reinforcing steel in concrete constructions by a multifunctional sensor," *Electrochim. Acta*, vol. 56, no. 4, pp. 1881-1888, 2011.
- [10] U. M. Angst, B. Elsener, C. K. Larsen, and Ø. Vennesland, "Chloride induced reinforcement corrosion: Electrochemical monitoring of initiation stage and chloride threshold values," *Corros. Sci.*, vol. 53, no. 4, pp. 1451-1464, 2011.
- [11] H. Karla, C. K. Larsen, and M. R. Geiker, "Relationship between concrete resistivity and corrosion rate - A literature review," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 39, pp. 60-72, 2013.
- [12] A. Aït-Mokhtar *et al.*, "Experimental investigation of the variability of concrete durability properties," *Cem. Concr. Res.*, vol. 45, pp. 21-36, 2013.
- [13] P. Azarsa and R. Gupta, "Electrical Resistivity of Concrete for Durability Evaluation: A Review," *Adv. Mater. Sci. Eng.*, vol. 2017, 2017.
- [14] K. Subbiah, S. Velu, S.-J. Kwon, H.-S. Lee, N. Rethinam, and D.-J. Park, "A novel in-situ corrosion monitoring electrode for reinforced concrete structures," *Electrochim. Acta*, vol. 259, no. January, pp. 1129-1144, 2018.
- [15] O. Almubaied, H. K. Chai, M. R. Islam, K.-S. Lim, and C. G. Tan, "Monitoring Corrosion Process of Reinforced Concrete Structure Using FBG Strain Sensor," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 66, no. 8, pp. 1-8, 2017.

- [16] T. Omar and M. L. Nehdi, "Remote sensing of concrete bridge decks using unmanned aerial vehicle infrared thermography," *Autom. Constr.*, vol. 83, no. July, pp. 360-371, 2017.
- [17] K. Barlish and K. Sullivan, "How to measure the benefits of BIM – A case study approach," *Autom. Constr.*, vol. 24, pp. 149-159, 2012.
- [18] R. Vanlande, C. Nicolle, and C. Cruz, "IFC and building lifecycle management," *Autom. Constr.*, vol. 18, pp. 70-78, 2008.
- [19] Z. Hu, J. Zhang, F. Yu, P. Tian, and X. Xiang, "Construction and facility management of large MEP projects using a multi-Scale building information model," *Adv. Eng. Softw.*, vol. 100, pp. 215-230, 2016.
- [20] Q. Lu, L. Chen, S. Lee, and X. Zhao, "Activity theory-based analysis of BIM implementation in building O & M and first response," *Autom. Constr.*, vol. 85, no. October 2017, pp. 317-332, 2018.
- [21] G. Krigsvoll, M. Fumo, and R. Morbiducci, "National and international standardization (international organization for standardization and European committee for standardization) relevant for sustainability in construction," *Sustainability*, vol. 2, no. 12, pp. 3777-3791, 2010.
- [22] Y. Arayici and P. Coates, "A System Engineering Perspective to Knowledge Transfer: A Case Study Approach of BIM Adoption," *Virtual Real. - Hum. Comput. Interact.*, vol. 2006, pp. 179-206, 2012.
- [23] J. C. Lino, M. Azenha, and P. Lourenço, "Integração da Metodologia BIM na Engenharia de Estruturas," *Encontro Nac. Betão Estrutural -BE2012*, pp. 24-26, 2012.
- [24] Construction Products Association, *The Future for Construction Product Manufacturing - Digitalisation, Industry 4.0 and the Circular Economy*, Constructi. London, 2016.
- [25] J. Appleton, "CONSTRUÇÕES EM BETÃO - Nota histórica sobre a sua evolução." <http://www.civil.ist.utl.pt/~crisina/GDBAPE/ConstrucoesEmBetao.pdf>. Acessado em 29/06/2016.
- [26] CIMbéton, "Histoire du béton: Naissance et développement, 1818-1970," in *Cahier des modules de conférence pour les écoles d'architecture B90A*, 2009.
- [27] J.-F. Denoël, B. Espion, A. Hellebois, and M. Provost, *HISTOIRES DE BÉTON ARMÉ - PATRIMOINE, DURABILITÉ ET INNOVATIONS*, FEBELCEM. Bruxelles, 2013.
- [28] A. Delesse, *Matériaux de construction de l'exposition universelle de 1855*, no. 1. Paris, 1855.
- [29] M.-A. Morel, "Le ciment armé et ses applications," *ENCYCLOPÉDIE SCIENTIFIQUE EES AIDE-MEMOIRE*, vol. 1. p. 194, 1902.
- [30] J. Crépin-Leblond, "Le Beton Armé, n° 7," *Organe des Concessionnaires et Agents du Système HENNEBSO.UE*, France, 1898.
- [31] E. C. Eckel, "Cement Materials and Industry of the United States," *UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY*, Washington, p. 467, 1905.
- [32] *Regulamento para o emprego do beton armado - Decreto nº 4036 de 28 de Março*. 1918.

- [33] *Regulamento do betão armado - Decreto nº 25948 de 16 de Outubro. 1935.*
- [34] *Regulamento de estruturas de betão armado - Decreto nº 47723, de 20 de Maio. 1967.*
- [35] *Regulamento de estruturas de betão armado e pré-esforçado - Decreto-Lei nº 349-C/83 de 30 de Julho. 1983.*
- [36] C. (LNEC), “NP EN 1992 - Projecto de estruturas de betão armado,” Caparica, 2010.
- [37] C. (ATIC), “NP EN 206 - 1 - Betão. Parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade,” Caparica, 2007.
- [38] C. (ATIC), “NP EN 13670-1 - Execução de estruturas de betão,” Caparica, 2010.
- [39] LNEC, “Especificação LNEC E 464 - Betões. Metodologia prescritiva para uma vida útil de projeto de 50 e de 100 anos face às ações ambientais.,” Lisboa, 2005.
- [40] S. Fennis-Huijben, “Design of Ecological Concrete by Particle Packing Optimization,” TU Delft, 2011.
- [41] J. Ke, M. Mcneil, L. Price, N. Z. Khanna, and N. Zhou, “Estimation of CO2 emissions from China ’ s cement production : Methodologies and uncertainties,” *Energy Policy*, vol. 57, no. June, pp. 172-181, 2013.
- [42] C. G. Manias, “Kiln Burning Systems,” *Innov. Portl. Cem. Manuf.*, 2004.
- [43] “Major countries in worldwide cement production from 2012 to 2017 (in million metric tons),” *US Geological Survey*, 2018. [Online]. Available: <https://www.statista.com/statistics/267364/world-cement-production-by-country/>. [Accessed: 17-May-2018].
- [44] H. Baker and E. Brent, “Low Carbon Technology Partnerships initiative Action for Impact,” WBCSD, 2017.
- [45] World Business Council for Sustainable Development, “The Cement Sustainability Initiative, Cement industry energy and CO2 performance: ‘Getting the numbers right,’” 2016.
- [46] M. Stefanoni, U. Angst, and B. Elsener, “Corrosion rate of carbon steel in carbonated concrete - A critical review,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 103, no. June 2017, pp. 35-48, 2018.
- [47] F. Pacheco-Torgal, J. P. Castro-Gomes, and S. Jalali, “Investigations of tungsten mine waste geopolymeric binder: Strength and microstructure,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 22, no. 11, pp. 2212-2219, 2008.
- [48] N. Sedira, J. Castro-Gomes, G. Kastiukas, X. Zhou, and A. Vargas, “A review on mineral waste for chemical-activated binders: mineralogical and chemical characteristics,” *Min. Sci.*, vol. 24, pp. 29-58, 2017.
- [49] F. Pacheco Torgal and S. Jalali, *Ligantes obtidos por activação alcalina. Parte 2 - Durabilidade*, no. 37. 2010.
- [50] P. K. Mehta, “Reducing the environmental impact of concrete,” *Concr. Int.*, no. October, pp. 61-66, 2001.
- [51] J. Pacheco, L. Doniak, and M. Carvalho, “THE PARADOX OF HIGH PERFORMANCE CONCRETE USED FOR REDUCING ENVIRONMENTAL IMPACT AND SUSTAINABILITY

- INCREASE,” in *Second International Conference on Concrete Sustainability*, 2016, pp. 442-453.
- [52] H.-S. Lee, V. Saraswathy, S.-J. Kwon, and S. Karthick, “Corrosion Inhibitors for Reinforced Concrete: A Review,” in *Corrosion Inhibitors, Principles and Recent Applications*, Intech, 2018, pp. 95-120.
- [53] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, “EN 1504-2: Products and systems for the protection and repair of concrete structures - Definitions, requirements, quality control and evaluation of conformity. Part 2: Surface protection systems for concrete,” vol. 3. pp. 1-46, 2004.
- [54] M. H. F. de Medeiros, E. Pereira, V. A. Quarcioni, and P. R. do Lago Helene, “Surface treatment systems for concrete in marine environment: Effect of concrete cover thickness,” *Rem Rev. Esc. Minas*, vol. 69, no. 3, pp. 287-292, 2016.
- [55] S. Keßler, U. Angst, M. Zintel, B. Elsener, and C. Gehlen, “Epoxy-coated reinforcement in concrete structures: Results of a Swiss pilot project after 24 years of field exposure,” *Mater. Corros.*, vol. 67, no. 6, pp. 631-638, 2016.
- [56] M. Panossian, Zehbour; L. Cardoso, Juliana; Araujo, Adriana de; Ribeiro, José Luis S. ; Stecanella Pacheco, “Desempenho de armaduras de aço-carbono zincadas em estruturas de concreto frente à corrosão em ambiente marinho tropical,” in *14ª Conferência sobre Tecnologia de Equipamentos*, 2017, no. May.
- [57] M. M. S. Cheung and C. Cao, “Application of cathodic protection for controlling macrocell corrosion in chloride contaminated RC structures,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 45, pp. 199-207, 2013.
- [58] M. for C. C. ACI Committee E-701, “Reinforcement for Concrete – Materials and Applications,” 2006.
- [59] V. Calvet, M. Valcuende, J. Benlloch, and J. Cánoves, “Influence of moderate temperatures on the bond between carbon fibre reinforced polymer bars (CFRP) and concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 94, pp. 589-604, 2015.
- [60] P. A. M. Basheer, “‘Clam’ permeability tests for assessing the durability of concrete,” The Queen’s University of Belfast, 1991.
- [61] A. E. U. Long, G. D. Henderson, and F. R. Montgomery, “Why assess the properties of near-surface concrete?,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 15, pp. 65-79, 2001.
- [62] CEB, “Durable Concrete Structures,” Lausanne, 1992.
- [63] L. Bertolini, B. Elsener, P. Pedferri, and R. P. Polder, “Transport Processes in Concrete,” in *Corrosion of Steel in Concrete*, Weinheim: Verlag, 2004, pp. 21-33.
- [64] Y. Zhang and M. Zhang, “Transport properties in unsaturated cement-based materials - A review,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 72, pp. 367-379, 2014.
- [65] A. Neville, *Properties of concrete*. Pearson, 1995.
- [66] E. P. Kearsley and P. J. Wainwright, “Porosity and permeability of foamed concrete,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 31, pp. 805-812, 2001.
- [67] P. K. Mehta and P. J. M. Monteiro, *Concrete Microstructure, Properties and Materials*.

2001.

- [68] A. de Sousa Coutinho, *Fabrico e propriedades do betão*, LNEC. Lisboa, 1997.
- [69] J. Coutinho, "Prolongar a vida útil de estruturas de betão armado com CPF.," *Rev. Int. Construlink*, vol. 1, nº 3, 2003.
- [70] J. de S. Coutinho, "Melhoria da durabilidade dos betões por tratamento da cofragem," Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1998.
- [71] L. Basheer, J. Kropp, and D. J. Cleland, "Assessment of the durability of concrete from its permeation properties: a review," *Constr. Build. Mater.*, vol. 15, pp. 93-103, 2001.
- [72] LNEC, "Especificação LNEC E 465 - Betão. Metodologia para estimar as propriedades de desempenho do betão que permitem satisfazer a vida útil de projeto de estruturas de betão armado e pré-esforçado sob as exposições ambientais XC e XS.," Lisboa, 2005.
- [73] A. Costa and J. Appleton, "Análise da penetração de cloretos em estruturas de betão armado expostas ao ambiente marítimo," *Rev. Port. Eng. Estruturas*, vol. 46, pp. 3-13, 1999.
- [74] F. P. Glasser, J. Marchand, and E. Samson, "Durability of concrete – Degradation phenomena involving detrimental chemical reactions," *Cem. Concr. Res.*, vol. 38, pp. 226-246, 2008.
- [75] A. Costa, "Anomalias e Mecanismos de deterioração, Módulo 2, Apontamentos da Cadeira de Reabilitação e Reforço Estrutural." Instituto Superior Técnico, Lisboa, 1999.
- [76] A. F. Gonçalves, A. B. Ribeiro, and M. J. Ferreira, "The new LNEC specifications on reinforced concrete durability," in *RILEM PROCEEDINGS PRO*, 2007, vol. 56, pp. 131-140.
- [77] S. Ribeiro, A. Ribeiro, and A. Gonçalves, "Resistências estimada e real do betão à carbonatação Aplicação da especificação LNEC E465," in *Encontro Nacional Betão Estrutural 2008*, 2008, p. 10.
- [78] K. D. Stanish, R. D. Hooton, and M. D. A. Thomas, "Testing the Chloride Penetration Resistance of Concrete: A Literature Review by," Washington, 1997.
- [79] L. Wu, W. Li, and X. Yu, "Time-dependent chloride penetration in concrete in marine environments," *Constr. Build. Mater.*, vol. 152, pp. 406-413, 2017.
- [80] R. B. Polder and W. H. A. Peelen, "Characterisation of chloride transport and reinforcement corrosion in concrete under cyclic wetting and drying by electrical resistivity," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 24, no. 5, pp. 427-435, 2002.
- [81] R. Malheiro, A. Camões, G. Meira, M. T. Amorim, J. Castro-Gomes, and R. M. Ferreira, "Behaviour of cementitious matrices subjected to the combined action of chloride ions and carbonation," *Rev. Mater.*, vol. 23, no. 3, 2018.
- [82] M. Isteita and Y. Xi, "The effect of temperature variation on chloride penetration in concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 156, pp. 73-82, 2017.
- [83] H. Justnes, M. O. Kim, S. Ng, and X. Qian, "Methodology of calculating required chloride diffusion coefficient for intended service life as function of concrete cover in reinforced marine structures," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 73, pp. 316-323, 2016.

- [84] fib Bulletin 34, *Model Code for Service Life Design*. Lausanne, 2006.
- [85] fib bulletin, *Model Code 2010*. Lausanne, 2010.
- [86] C. Andrade, J. M. Diez, and C. Alonso, "Mathematical modeling of a concrete surface 'skin effect' on diffusion in chloride contaminated media," *Adv. Cem. Based Mater.*, vol. 6, no. 2, pp. 39-44, 1997.
- [87] G. K. Glass and N. R. Buenfeld, "The influence of chloride binding on the chloride induced corrosion risk in reinforced concrete," *Corros. Sci.*, vol. 42, no. 2, pp. 329-344, 2000.
- [88] S. Lorente and J. Auger, "Sulfate transfer through concrete : Migration and diffusion results," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 33, no. 7, pp. 735-741, 2011.
- [89] M. T. Pinheiro-Alves, F. Gomá, and S. Jalali, "UM CIMENTO MAIS SUSTENTÁVEL FRENTE A UM ATAQUE SEVERO POR SULFATOS," in *Congresso Construção 2007 - 3.º Congresso Nacional*, 2007, p. 11.
- [90] W. Piasta, J. Marczevska, and M. Jaworska, "SOME ASPECTS AND MECHANISMS OF SULPHATE ATTACK," *Struct. Environ.*, vol. 6, No. 3, pp. 19-24, 2014.
- [91] T. Ikumi, S. H. P. Cavalaro, I. Segura, A. De Fuente, and A. Aguado, "Simplified methodology to evaluate the external sulfate attack in concrete structures," *JMADE*, vol. 89, pp. 1147-1160, 2016.
- [92] B. Erlin and D. C. Stark, "Identification and Occurrence of Thaumassite in Concrete," in *HRB Symposium on Aggressive Fluids*, 1965, pp. 108-113.
- [93] W. Müllauer, R. E. Beddoe, and D. Heinz, "Sulfate attack expansion mechanisms," *Cem. Concr. Res.*, vol. 52, pp. 208-215, 2013.
- [94] C. Shi, D. Wang, and A. Behnood, "Review of Thaumassite Sulfate Attack on Cement Mortar and Concrete," *J. Mater. Civ. Eng.*, no. December, pp. 1450-1460, 2012.
- [95] S. W. Tang, Y. Yao, C. Andrade, and Z. J. Li, "Recent durability studies on concrete structure," *Cem. Concr. Res.*, vol. 78, pp. 143-154, 2015.
- [96] Z. Liu, D. Deng, and G. De Schutter, "Does concrete suffer sulfate salt weathering?," *Constr. Build. Mater.*, vol. 66, pp. 692-701, 2014.
- [97] LNEC, "Especificação LNEC E 461 - Betões. Metodologia para prevenir reações expansivas internas," Lisboa, 2004.
- [98] M. B. Santos and J. De Brito, "Reacções Expansivas De Origem Interna No Betão : Fundamentos Da Reacção Álcalis-Sílica," *Rev. Int. Construlink*, vol. 8, pp. 4-14, 2010.
- [99] J. Feiteira, J. Custódio, and M. S. S. Ribeiro, "Review and discussion of polymer action on alkali-silica reaction," *Mater. Struct. Constr.*, vol. 46, no. 9, pp. 1415-1427, 2013.
- [100] A. Steffens, K. Li, and O. Coussy, "Aging approach to water effect on alkali-silica reaction degradation of structures," *J. Eng. Mech.*, vol. 129, no. 1, pp. 50-59, 2003.
- [101] P. Helene, M. Carvalho, and J. Pacheco, "Engineering field tests for alkali-aggregate reaction," *Struct. Concr.*, vol. 18, no. 2, pp. 349-355, 2017.
- [102] J. T. Houston, E. Atimtay, and P. M. Ferguson, "Corrosion of Reinforcing Steel Embedded in Structural Concrete," 1972.

- [103] J. Kepler, D. Darwin, and C. E. Locke, "Evaluation of Corrosion Protection Methods for RC," *Corrosion*, no. 58, p. 231, 2000.
- [104] C. Hansson, A. Poursaee, and S. Jaffer, "Corrosion of Reinforcing Bars in Concrete," *The Masterbuilder*, pp. 106-124, 2012.
- [105] C. (LNEC), "NP EN 1990 - Bases para o projecto de estruturas," Caparica, 2009.
- [106] A. Costa and J. Appleton, "Estruturas de betão I." IST, Lisboa, 2002.
- [107] Cimbéton, *Les bétons : formulation, fabrication et mise en œuvre*. Paris: Cimbéton, Collection Technique, 2013.
- [108] Y. P. Liu and R. E. Weyers, "Modeling the time-to-corrosion cracking in chloride contaminated reinforced concrete structures," *ACI Mater. J.*, vol. 95, pp. 675-681, Nov. 1998.
- [109] R. M. Ferreira, "Optimização da vida útil das estruturas de betão armado," *4as Jornadas Port. Eng. Estruturas*, pp. 1-16, 2006.
- [110] C. Andrade, "Especificaciones de cálculo de la vida útil y estado límite de corrosión.," *Alconpat*, vol. 3, No. 2, pp. 82-101, 2013.
- [111] L. E. C. T. C. Powers J. C. Hayes, and H. M. Mann, "Permeability of Portland Cement Paste," *J. Proc.*, vol. 51, no. 11, 1954.
- [112] J. A. González, C. Andrade, C. Alonso, and S. Feliu, "Comparison of rates of general corrosion and maximum pitting penetration on concrete embedded steel reinforcement," *Cem. Concr. Res.*, vol. 25, no. 2, pp. 257-264, 1995.
- [113] P. a M. Basheer, S. E. Chidiac, and a. E. Long, "Predictive models for deterioration of concrete structures," *Constr. Build. Mater.*, vol. 10, no. 1 SPEC. ISS., pp. 27-37, 1996.
- [114] K. Tan and O. E. Gjorv, "Performance of concrete under different curing conditions," *Cem. Concr. Res.*, vol. 26, no. 3, pp. 355-361, 1996.
- [115] P. C. Aïtcin, "The durability characteristics of high performance concrete: A review," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 25, no. 4-5 SPEC, pp. 409-420, 2003.
- [116] C. Carneiro, V. Lopes, J. Nogueira, and A. Mendes, "Revestimento acrílico monocomponente de base aquosa para protecção de betão por pintura," *Corrosão e Protecção Mater.*, vol. 28, pp. 92-97, 2009.
- [117] J. Qin, Y. Liu, and R. Grosvenor, "A Categorical Framework of Manufacturing for Industry 4.0 and beyond," *Procedia CIRP*, vol. 52, pp. 173-178, 2016.
- [118] T. D. Oesterreich and F. Teuteberg, "Understanding the implications of digitisation and automation in the context of Industry 4.0: A triangulation approach and elements of a research agenda for the construction industry," *Comput. Ind.*, vol. 83, pp. 121-139, 2016.
- [119] Y. Lu, "Industry 4.0: A survey on technologies, applications and open research issues," *J. Ind. Inf. Integr.*, vol. 6, pp. 1-10, 2017.
- [120] P. Leviäkangas, S. Mok Paik, and S. Moon, "Keeping up with the pace of digitization: The case of the Australian construction industry," *Technol. Soc.*, vol. 50, pp. 33-43, 2017.

- [121] J. Li and H. Yang, "A Research on Development of Construction Industrialization Based on BIM Technology under the Background of Industry 4.0," *MATEC Web Conf.*, vol. 100, p. 02046, 2017.
- [122] S. Wang, J. Wan, D. Zhang, D. Li, and C. Zhang, "Towards smart factory for industry 4.0: A self-organized multi-agent system with big data based feedback and coordination," *Comput. Networks*, vol. 101, pp. 158-168, 2016.
- [123] M. Bilal *et al.*, "Big Data in the construction industry: A review of present status, opportunities, and future trends," *Adv. Eng. Informatics*, vol. 30, no. 3, pp. 500-521, 2016.
- [124] P. Dallasega, E. Rauch, and C. Linder, "Industry 4.0 as an enabler of proximity for construction supply chains: A systematic literature review," *Comput. Ind.*, vol. 99, no. March, pp. 205-225, 2018.
- [125] A. Dubois and L. E. Gadde, "The construction industry as a loosely coupled system: Implications for productivity and innovation," *Constr. Manag. Econ.*, vol. 20, no. 7, pp. 621-631, 2002.
- [126] X. Li, P. Wu, G. Q. Shen, X. Wang, and Y. Teng, "Mapping the knowledge domains of Building Information Modeling (BIM): A bibliometric approach," *Autom. Constr.*, vol. 84, no. September, pp. 195-206, 2017.
- [127] P. Saieg, E. D. Sotelino, D. Nascimento, and R. G. G. Caiado, "Interactions of Building Information Modeling, Lean and Sustainability on the Architectural, Engineering and Construction industry: A systematic review," *J. Clean. Prod.*, vol. 174, pp. 788-806, 2018.
- [128] M. R. Hosseini, I. Martek, E. K. Zavadskas, A. A. Aibinu, M. Arashpour, and N. Chileshe, "Critical evaluation of off-site construction research: A Scientometric analysis," *Autom. Constr.*, vol. 87, no. December 2017, pp. 235-247, 2018.
- [129] W. Chen, K. Chen, J. C. P. Cheng, Q. Wang, and V. J. L. Gan, "BIM-based framework for automatic scheduling of facility maintenance work orders," *Autom. Constr.*, vol. 91, no. March, pp. 15-30, 2018.
- [130] P. Pishdad-Bozorgi, X. Gao, C. Eastman, and A. P. Self, "Planning and developing facility management-enabled building information model (FM-enabled BIM)," *Autom. Constr.*, vol. 87, no. December 2017, pp. 22-38, 2018.
- [131] P. Schiessl and M. Raupach, "Monitoring of the corrosion risk for the reinforcement of bridges," in *BRIDGE REHABILITATION. PROCEEDINGS OF THE 3RD INTERNATIONAL WORKSHOP ON BRIDGE REHABILITATION, JUN, 1992*, pp. 741-752.
- [132] W. Morris, A. Vico, and M. Vázquez, "Chloride induced corrosion of reinforcing steel evaluated by concrete resistivity measurements," *Electrochim. Acta*, vol. 49, pp. 4447-4453, 2004.
- [133] N. Birbilis and B. W. Cherry, "Alternative methodology for on site monitoring of corrosion and remediation of reinforced concrete," *Corros. Eng. Sci. Technol.*, vol. 39, no. 4, pp. 321-326, 2004.

- [134] U. Angst, B. Elsener, C. K. Larsen, and Ø. Vennesland, "Critical chloride content in reinforced concrete - A review," *Cem. Concr. Res.*, vol. 39, pp. 1122-1138, 2009.
- [135] G. Qiao and T. Liu, "Characterization of the reinforcing steel corrosion by potentialdynamic scan approach," *J. Wuhan Univ. Technol. Mater. Sci. Ed.*, vol. 27, no. 3, pp. 418-421, 2012.
- [136] A. Brenna, L. Lazzari, and M. Ormellese, "Monitoring chloride-induced corrosion of carbon steel tendons in concrete using a multi-electrode system," *Constr. Build. Mater.*, vol. 96, pp. 434-441, 2015.
- [137] ASTM International, "ASTM C 876-1991 - Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete," West Conshohocken, PA, 1999.
- [138] O. Sengul and O. E. Gjrv, "Electrical Resistivity Measurements for Quality Control During Concrete Construction," *ACI Mater. J.*, no. 105, pp. 541-547, 2009.
- [139] H. Song and V. Saraswathy, "Corrosion Monitoring of Reinforced Concrete Structures - A Review," *Int. J. Electrochem. Sci.*, vol. 2, pp. 1-28, 2007.
- [140] C. U. Andrade and C. Alonso, "On-site measurements of corrosion rate of reinforcements," *Constr. Build. Mater.*, vol. 15, pp. 141-145, 2001.
- [141] H. R. Soleymani and M. E. Ismail, "Comparing corrosion measurement methods to assess the corrosion activity of laboratory OPC and HPC concrete specimens," *Cem. Concr. Res.*, vol. 34, no. 11, pp. 2037-2044, 2004.
- [142] P. Brito, L. Rodrigues, and P. Cunha, "Apresentao de um Sistema de Monitorização da Degradação de Estruturas de Beto Armado," *Ingenium*, vol. 98, 2007.
- [143] B. Elsener, "Corrosion rate of steel in concrete-Measurements beyond the Tafel law," *Corros. Sci.*, vol. 47, no. 12, pp. 3019-3033, 2005.
- [144] E. V. Pereira, R. B. Figueira, M. M. L. Salta, and I. T. E. da Fonseca, "A galvanic sensor for monitoring the corrosion condition of the concrete reinforcing steel: Relationship between the galvanic and the corrosion currents," *Sensors*, vol. 9, no. 11, pp. 8391-8398, 2009.
- [145] A. Merioua, A. Bezzar, and F. Ghomari, "Non-destructive Electrical Methods for Measuring the Physical Characteristics of Porous Materials," *J. Nondestruct. Eval.*, vol. 34, no. 2, p. 13, 2015.
- [146] P. S. D. Brito and P. Romano, "Monitoring Electrochemical Degradation of Concrete Structures," *Recent Patents Corros. Sci.*, vol. 13, no. 2, pp. 156-163, 2013.
- [147] M. Jin, L. Jiang, D. Tao, and S. Bai, "Characterization of Ag/AgCl electrode manufactured by immersion in sodium hypochloride acid for monitoring chloride content in concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 122, pp. 310-319, 2016.
- [148] C. (ATIC), "NP EN 12504-4 - 'Testing concrete in structures. Part 4: Determination of ultrasonic pulse velocity,'" Caparica, 2007.
- [149] ASTM International, "ASTM C597 - 16, Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete," West Conshohocken, PA, 2016.
- [150] E. A. Whitehurst, *The Soniscope — a Device for Field Testing of Concrete*. Purdue

University, 1951.

- [151] I. A. E. A. IAEA, "Guidebook on non-destructive testing of concrete structures," *Train. Course Ser.*, vol. 17, no. 17, p. 231, 2002.
- [152] V. G. Haach and F. C. Ramirez, "Qualitative assessment of concrete by ultrasound tomography," *Constr. Build. Mater.*, vol. 119, pp. 61-70, 2016.
- [153] B. Torres, I. Payá-Zaforteza Ignacio, P. A. Calderón, and J. M. Adam, "Analysis of the strain transfer in a new FBG sensor for Structural Health Monitoring," *Eng. Struct.*, vol. 33, no. 2, pp. 539-548, 2011.
- [154] J. M. Kim, C. M. Kim, S. Y. Choi, and B. Y. Lee, "Enhanced strain measurement range of an FBG sensor embedded in seven-wire steel strands," *Sensors (Switzerland)*, vol. 17, no. 7, 2017.
- [155] J. M. Kim, H. W. Kim, S. Y. Choi, and S. Y. Park, "Measurement of Prestressing Force in Pretensioned UHPC Deck Using a Fiber Optic FBG Sensor Embedded in a 7-Wire Strand," *J. Sensors*, vol. 2016, p. 9 pages, 2016.
- [156] C. Y. Hong, Y. F. Zhang, M. X. Zhang, L. M. G. Leung, and L. Q. Liu, "Application of FBG sensors for geotechnical health monitoring, a review of sensor design, implementation methods and packaging techniques," *Sensors Actuators, A Phys.*, vol. 244, pp. 184-197, 2016.
- [157] M. Majumder, T. K. Gangopadhyay, A. K. Chakraborty, K. Dasgupta, and D. K. Bhattacharya, "Fibre Bragg gratings in structural health monitoring-Present status and applications," *Sensors Actuators, A Phys.*, vol. 147, no. 1, pp. 150-164, 2008.
- [158] C. Rodrigues, R. Faria, and J. Figueiras, "Monitorização Experimental da Nova Barragem do Alto Ceira Usando a Tecnologia da Fibra Ótica," in *Encontro Nacional BETÃO ESTRUTURAL - BE2012*, 2012, no. May 2014, pp. 24-26.
- [159] J. Mao, J. Chen, L. Cui, W. Jin, C. Xu, and Y. He, "Monitoring the corrosion process of reinforced concrete using BOTDA and FBG sensors," *Sensors (Switzerland)*, vol. 15, no. 4, pp. 8866-8883, 2015.
- [160] W. Li, C. Xu, S. C. M. Ho, B. Wang, and G. Song, "Monitoring Concrete Deterioration Due to Reinforcement Corrosion by Integrating Acoustic Emission and FBG Strain Measurements," *Sensors, Vol 17, Iss 3, p 657 (2017)*, vol. 17, no. 3. p. 657, 2017.
- [161] S. Abu Dabous, S. Yaghi, S. Alkass, and O. Moselhi, "Concrete bridge deck condition assessment using IR Thermography and Ground Penetrating Radar technologies," *Autom. Constr.*, vol. 81, pp. 340-354, 2017.
- [162] M. . Clark, D. . McCann, and M. . Forde, "Application of infrared thermography to the non-destructive testing of concrete and masonry bridges," *NDT E Int.*, vol. 36, no. 4, pp. 265-275, 2003.
- [163] ASTM International, "ASTM D 4788-2007 - Standard Test Method for Detecting Delaminations in Bridge Decks Using Infrared," West Conshohocken, PA, 2007.
- [164] H. Cannard, M. Mahrez, T. Perrin, V. Muzet, D. Prybyla, and F. Brachelet, "The use of infrared thermography for defects detection on reinforced concrete bridges," *Proc.*

12th Quant. InfraRed Thermogr. Conf., 2014.

- [165] M. M. CALDEIRA, I. J. PADARATZ, M. M. CALDEIRA, and I. J. PADARATZ, "Potentialities of infrared thermography to assess damage in bonding between concrete and GFRP," *Rev. IBRACON Estruturas e Mater.*, vol. 8, no. 3, pp. 296-322, 2015.
- [166] E. J. Jaselskis and T. El-Misalami, "Implementing Radio Frequency Identification in the Construction Process," *J. Constr. Eng. Manag.*, vol. 129, no. 6, pp. 680-688, 2003.
- [167] E. Valero, A. Adán, and C. Cerrada, "Evolution of RFID applications in construction: A literature review," *Sensors (Switzerland)*, vol. 15, no. 7, pp. 15988-16008, 2015.
- [168] M. Cheng, L.-C. Lien, M.-H. Tsai, and W. Chen, "OPEN-BUILDING MAINTENANCE MANAGEMENT USING RFID TECHNOLOGY Li-Chuan Lien Ming-Hsiu Tsai," in *24th International Symposium on Automation & Robotics in Construction (ISARC 2007)*, 2007, no. January, pp. 41-46.
- [169] E. Pereira and M. Salta, "CORROSION MONITORING SYSTEMS INSTALLED IN PORTUGUESE STRUCTURES," Lisbon, Portugal, 2016.
- [170] P. Romano, P. S. D. Brito, and L. Rodrigues, "Monitoring of the degradation of concrete structures in environments containing chloride ions," *Constr. Build. Mater.*, vol. 47, pp. 827-832, 2013.
- [171] P. Cunha, "Desenvolvimento e avaliação de um sistema de monitorização da corrosão electroquímica no betão," Aveiro University, Portugal, 2011.
- [172] H. E. I. C. LTD, "Concrete structure durability real-time monitoring sensor, Pat. CN202533356U," 2012.
- [173] T. Srinivasan, Rengaswamy; Saffarian, Hassan; Philips, "Embeddable corrosion rate meters for remote monitoring of structures susceptible to corrosion, Pat. US2006/0125480A1," 2006.
- [174] K. Eun Joo, Cho; In Soo, "Corrosion probe measuring concrete corrosion damage using thin film and measure system using thin film and measuring method thereof, Pat. KR20120029303A," 2012.
- [175] W. HILL, "Measuring device for monitoring the corrosion of a steel reinforcement, Pat. US2010/0108510A1," 2010.
- [176] L. Yu, Hui; Caseres, "Corrosion sensor, Pat. US2011/0259092A1," 2011.
- [177] C. Dong, Liu; Wei-jun; Ling, Fan; Zhen, Dongrong; Standard, "Sensor device for long-term monitoring of reinforcement corrosion conditions and applied inside concrete, Pat. CN102721642A," 2012.
- [178] L. Haitao, Wen; Chang, "Portable reinforced concrete corrosion measuring instrument, Pat. CN201945546U," 2011.
- [179] D. Jiang, Lilan; Sizhen, Li; Rong, DU; Chang-Jian, LIN; Rong Gang, HU; Shigang, "Multifunctional sensor for monitoring reinforced concrete structure erosion, Pat. CN101334353A," 2008.
- [180] D. yellow P. Wen, Haitao; Chang-Jian, LIN; Shigang, "On-line monitoring system for corrosion of reinforcement in concrete, Pat. CN201212876Y," 2008.

- [181] D. Haitao, Wen; Chang-Jian, LIN; Shigang, "Corrosion on-line monitoring system for reinforced bar in concrete, Pat. CN101315324A," 2008.
- [182] F. C. Jing cheery, NI; Xiang, FANG; Haihong, Li; Yanbing, Wang; Jianbo, Xiong; Sheng, Wang; Yingfei, Wang; Zhihong, "Real-time monitoring sensor for durability of concrete structures and fabricating method, Pat. CN102680387A," 2012.
- [183] F. C. Hong, Wangxia; Xiang, Fang; Haihong, Li; Yanbing, Wang; Jianbo, Xiong; Sheng, Wang; Yingfei, Wang; Zhihong, "A reinforcing steel bar concrete for reference electrode and manufacturing method thereof, Pat. CN102401781A," 2012.
- [184] O. Guofu, Qiao; Jin-ping, "Five electrode steel bar corrosion monitoring sensor and its preparation method, Pat. CN101144769A," 2008.
- [185] O. Guofu, Qiao; Jin-ping, "Complete solid-state beam current type reinforcing steel corrosion monitoring sensor and method for producing the same, Pat. CN101299018A," 2007.
- [186] O. Guofu, Qiao; Jin-ping, "All-solid reference electrode for monitoring steel bar corrosion of concrete and its preparation method, Pat. CN101144790A," 2008.
- [187] P. Yao, "Embedment type reference electrode for inspecting/detecting steel reinforced concrete erosion, Pat. CN101226164A," 2008.
- [188] S. Syrah, Liu; Xiao Bing, "Split adjustable sensor for monitoring reinforcement corrosion long-term, Pat. CN101256135A," 2008.
- [189] P. Brito, L. Rodrigues, and P. Cunha, "Sistema de monitorização, em tempo real, da corrosividade do betão e do estado corrosivo das armaduras de estruturas de betão armado ou pré-esforçado," Patente 102269, 2001.
- [190] L. Kuang-Tsan; Chiang, Kenneth; Yang, "Corrosion monitoring of concrete Reinforcement bars (or other buried corrodable structures) using distributed node electrodes, Pat. US2012/0043981A1," 2012.
- [191] O. Guofu, Qiao; Jinping, "Wireless self-energy accumulation corrosion sensor and manufacturing method thereof, Pat. CN101893593A," 2010.
- [192] C. Tiejun, Zhao; Jianguang, Xu; Peng, Zhang; Penggang, Wang; Jizhou, "Steel bar corrosion time predicting device, Pat. CN202033274U," 2011.
- [193] V. . Legat, A.; Kuhar, "Sensor, device and procedure for corrosion rate evaluation of steel rebar in concrete structures, Pat. SI22559(A)," 2008.
- [194] P. Brito, L. Rodrigues, and P. Cunha, "Sistema de monitorização da resistividade iónica e da corrosividade, do betão na camada de recobrimento, em estruturas de betão armado ou pré-esforçado," Patente 104554, 2010.
- [195] Zhi-Dong Zhou; Cheng Xuan; Zheng Qiaoming;, "Reinforced concrete embedded type corrosion sensor, Pat. CN101706408A," 2010.
- [196] X. Jiang, S. Neši, F. Huet, B. Kinsella, B. Brown, and D. Young, "Selection of Electrode Area for Electrochemical Noise Measurements to Monitor Localized CO₂ Corrosion," *J. Electrochem. Soc.*, vol. 7, pp. 1-16, 2012.
- [197] J. W. Dahai XIA, Jiangbo SHI, Wenqi GONG, Rongji ZHOU, Zhiming GAO, "The

- Significance of Correlation Dimension Obtained from Electrochemical Noise,” *Electrochemistry*, vol. 80(11), pp. 907-912, 2012.
- [198] ASTM International, “ASTM G 109-99A, Standard Test Method for determining the Effects of Chemical Admixtures on the Corrosion of Embedded Steel Reinforcement in Concrete Exposed to Chloride Environments,” West Conshohocken, PA, 2005.
- [199] ASTM International, “ASTM C 1012-4 - Standard test method for length change of hydraulic-cement mortars exposed to a sulfate solution,” West Conshohocken, PA, 2004.
- [200] C. (ATIC), “NP EN 12390-4 - ‘Resistência à compressão. Características das máquinas de ensaio.’” Caparica, 2003.
- [201] LNEC, “Especificação LNEC E 391 - Betões. Determinação da resistência à carbonatação,” Lisboa, 1993.
- [202] “NT BUILD 492 ‘Chloride Migration Coefficients from Non-Steady-State Migration Experiments,’” Espoo, Finland, 1999.
- [203] M. Raupach and P. Schiessl, “Monitoring system for the penetration of chlorides, carbonation and the corrosion risk for the reinforcement,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 11, no. 4, pp. 207-214, 1997.
- [204] U. Angst, B. Elsener, C. K. Larsen, and Ø. Vennesland, “Chloride induced reinforcement corrosion: Rate limiting step of early pitting corrosion,” *Electrochim. Acta*, vol. 56, no. 17, pp. 5877-5889, 2011.
- [205] M. I. Rafiq, M. K. Chryssanthopoulos, and T. Onoufriou, “Performance updating of concrete bridges using proactive health monitoring methods,” *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 86, no. 3, pp. 247-256, 2004.
- [206] S. Muralidharan, V. Saraswathy, A. Madhavamayandi, K. Thangavel, and N. Palaniswamy, “Evaluation of embeddable potential sensor for corrosion monitoring in concrete structures,” *Electrochim. Acta*, vol. 53, no. 24, pp. 7248-7254, 2008.
- [207] M. B. Otieno, H. D. Beushausen, and M. G. Alexander, “Modelling corrosion propagation in reinforced concrete structures - A critical review,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 33, no. 2, pp. 240-245, 2011.
- [208] C. Andrade, M. Castellote, and R. D’Andrea, “Measurement of ageing effect on chloride diffusion coefficients in cementitious matrices,” *J. Nucl. Mater.*, vol. 412, no. 1, pp. 209-216, 2011.
- [209] K. Videm, “Corrosion and electrochemistry of zinc in alkaline solutions and in cement mortar,” in *Corrosion of reinforcement in concrete - Mechanisms, monitoring, inhibitors and rehabilitation techniques*, The Institute of Materials, Minerals & Mining, 2007, pp. 10-26.
- [210] J. J. Assaad and C. a. Issa, “Bond strength of epoxy-coated bars in underwater concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 30, pp. 667-674, 2012.
- [211] E. F. Irassar, M. González, and V. Rahhal, “Sulphate resistance of type V cements with limestone filler and natural pozzolana,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 22, no. 5, pp. 361-

368, 2000.

- [212] C. Sun, J. Chen, J. Zhu, M. Zhang, and J. Ye, "A new diffusion model of sulfate ions in concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 39, pp. 39-45, 2013.
- [213] T. Ikumi, S. H. P. Cavalaro, I. Segura, and A. Aguado, "Alternative methodology to consider damage and expansions in external sulfate attack modeling," *Cem. Concr. Res.*, vol. 63, pp. 105-116, 2014.
- [214] M. M. Amin, S. B. Jamaludin, F. C. Pa, and K. K. Chuen, "Effects of Magnesium Sulfate Attack on Ordinary Portland Cement (OPC) Mortars," *Port. Electrochim. Acta*, vol. 26, pp. 235-242, 2008.
- [215] A. R. Suleiman, A. M. Soliman, and M. L. Nehdi, "Effect of surface treatment on durability of concrete exposed to physical sulfate attack," *Constr. Build. Mater.*, vol. 73, pp. 674-681, 2014.
- [216] H. G. Alves, K. D. Neri, P. R. R. Ferreira, E. O. Vilar, G. R. Meira, and D. Tecnologia, "Aplicação da técnica de polarização linear para detectar corrosão em concreto armado atacados por SO₄ - e Cl⁻," pp. 2-7, 2012.
- [217] R. Polder *et al.*, "Rilem TC 154-EMC: electrochemical techniques for measuring metallic corrosion- test methods for on site measurement of resistivity of concrete," *Mater. Struct. Constr.*, vol. 33, no. December 2000, pp. 603-611, 2000.
- [218] A. Neville, "The confused world of sulfate attack on concrete," *Cem. Concr. Res.*, vol. 34, pp. 1275-1296, 2004.
- [219] E. F. Irassar, V. L. Bonavetti, M. a. Trezza, and M. a. González, "Thaumasite formation in limestone filler cements exposed to sodium sulphate solution at 20 °C," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 27, no. 1, pp. 77-84, 2005.
- [220] H. Layssi, P. Ghods, A. R. Alizadeh, and M. Salehi, "Electrical resistivity of concrete, Concepts, applications, and measurement techniques," *Concr. Int.*, vol. 37, no. 5, pp. 41-46, 2015.

Anexos

Estes anexos apresentam, de uma forma sucinta, imagens e resultados relativos aos ensaios que serviram de suporte a esta tese.

Anexo A - Imagens e resultados dos ensaios com cloretos.

Anexo B - Imagens e resultados dos ensaios com sulfatos.

Anexo C - Imagens e resultados dos ensaios na ETAR.

Anexo A - Ensaios com cloretos

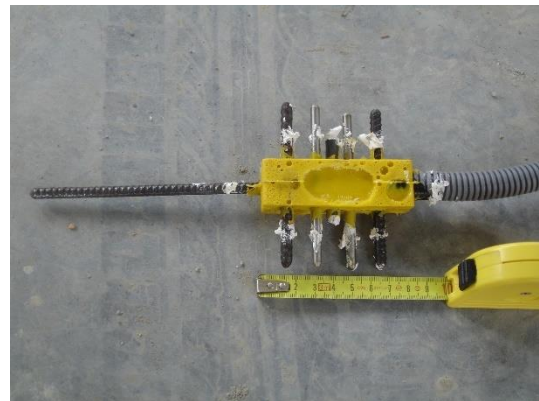
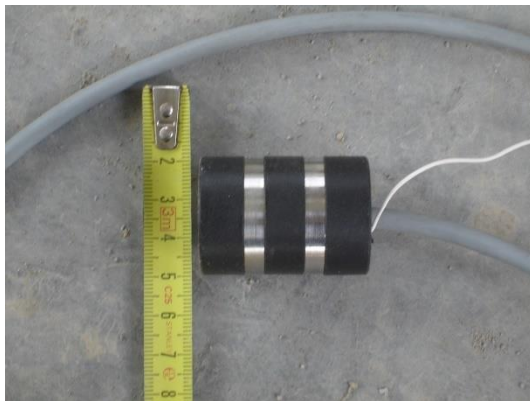


Figura A1 - Os sensores.

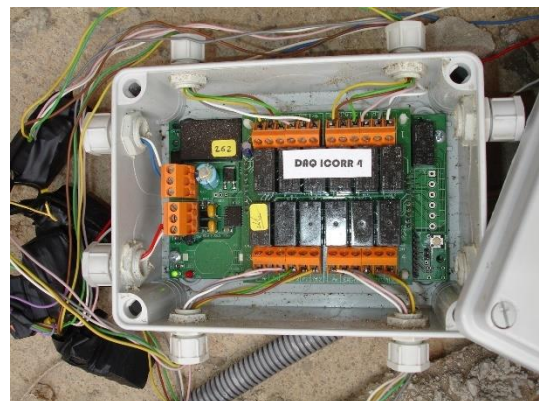


Figura A2 - Os sistemas de medição e recolha de dados.



Figura A3 - Preparação dos provetes.



Figura A4 - Betonagem dos provetes.



Figura A5 - Instalação dos provetes no laboratório.

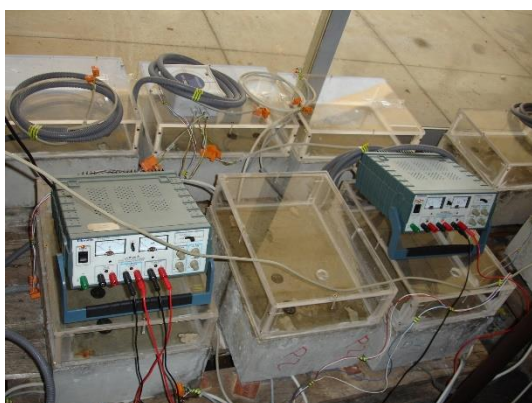


Figura A6 - Instalação de monitorização concluída.

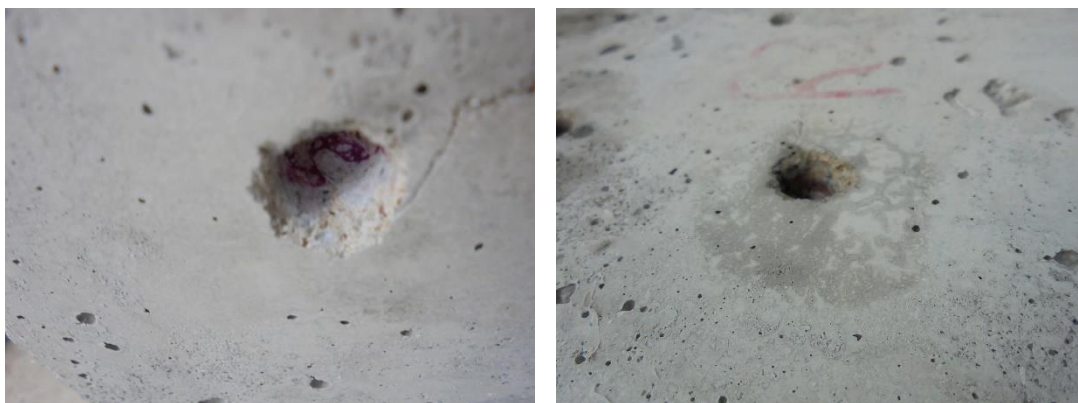


Figura A7 - Furação para extração de pó de betão para análise no XRF.



Figura A8 - Sensores extraídos dos provetes após os ensaios.



Figura A9 - Armaduras após os ensaios - armadura corrente e galvanizada.

Tabela A1 - Potencial e resistência de polarização linear (provete G2)

Provete	Dias	Rp (kOhm)		Dias	Ecorr (mV)
		3 cm			Armadura
G2	0	1,72		0	-295,23
	14	1,47		14	-281,38
	43	0,84		43	-321,38
	56	1,23		56	-244,06
	63	1,30		63	-234,16
	84	1,31		84	-201,27
	92	1,38		92	-187,34
	138	1,61		138	-172,19
	183	1,86		183	-179,39
	190	1,99		190	-164,22
	190	1,99		190	-163,64
	198	1,96		198	-186,63
	205	1,99		205	-217,43
	212	1,27		212	-374,43
	219	2,43		219	-371,62
	226	1,28		226	-382,02
	233	1,89		233	-300,56
	240	1,41		240	-330,42
	250	1,79		250	-297,75
	265	1,47		265	-334,45
	278	1,67		278	-306,95
	300	1,43		300	-320,55
	329	1,48		329	-298,93
	411	1,61		411	-259,14
	448	0,97		448	-376,42
	449	1,06		449	-365,19
	492	0,46		492	-543,70
	504	0,49		504	-530,45
	510	0,52		510	-513,76
	525	0,53		525	-501,95

Tabela A2 - Potencial e resistência de polarização linear (provete G3)

Provete	Dias	Rp (kOhm)		Dias	Ecorr (mV)
		3 cm			Armadura
G3	0	1,50		0	-275,31
	14	0,96		14	-312,19
	43	0,51		43	-331,17
	56	0,59		56	-303,58
	63	0,70		63	-294,56
	84	0,68		84	-239,19
	92	0,82		92	-233,08
	138	0,77		138	-234,54
	183	0,93		183	-203,43
	190	0,99		190	-200,28
	198	0,85		198	-250,07
	205	0,85		205	-244,09
	212	0,79		212	-299,17
	219	0,82		219	-284,05
	226	0,84		226	-281,72
	233	0,68		233	-353,49
	240	0,72		240	-299,73
	250	0,73		250	-299,62
	265	0,64		265	-337,28
	278	0,67		278	-320,73
	300	0,68		300	-312,72
	329	0,66		329	-292,90
	411	0,52		411	-358,86
	448	0,47		448	-377,21
	449	0,49		449	-375,07
	456	0,47		456	-372,19
	492	0,36		492	-402,19
	504	0,29		504	-482,47
	510	0,27		510	-503,36
	525	0,23		525	-537,50
	636	0,23		636	-601,72
	644	0,20		644	-610,25

Tabela A3 - Potencial e resistência de polarização linear (provete P3)

Provete	Dias	Rp (kOhm)		Dias	Ecorr (mV)
		3 cm			Armadura
P3	64	0,15		64	-803,87
	83	0,14		83	-760,39
	98	0,16		98	-777,90
	138	0,18		138	-811,52
	184	0,24		184	-897,76
	191	0,24		191	-871,57
	197	0,22		197	-957,22
	205	0,24		205	-1070,24
	212	0,25		212	-1063,16
	219	0,25		219	-1007,30
	226	0,26		226	-1042,40
	233	0,27		233	-1040,07
	243	0,25		243	-1071,32
	250	0,26		250	-942,48
	265	0,30		265	-864,73
	278	0,28		278	-861,46
	301	0,28		301	-809,57
	329	0,25		329	-816,79
	449	0,37		449	-171,54
	492	0,13		492	-1207,33
	505	0,13		505	-1208,80
	510	0,13		510	-1139,40
	525	0,13		525	-1178,16
	593	0,15		593	-1176,67

Tabela A4 - Potencial e resistência de polarização linear (provete R2)

Provete	Dias	Rp (kOhm)		Dias	Ecorr (mV)
		3 cm			Armadura
R2	14			14	-33,56
	55	2,29		55	31,11
	63	2,32		63	20,73
	138	3,21		138	53,45
	184	3,55		184	-2,97
	190	3,73		190	-5,50
	198	3,76		198	-5,34
	205	3,83		205	-6,52
	212	3,98		212	-15,37
	219	4,22		219	-11,75
	226	4,23		226	-8,94
	233	4,60		233	-13,62
	240	3,10		240	5,55
	240	3,23		240	19,99
	250	4,50		250	-12,38
	250	4,40		250	-8,10
	265	4,56		265	-14,65
	278	4,38		278	-7,34
	301	4,67		301	-24,43
	329	4,57		329	-33,15
	413	2,96		413	-71,31
	448	2,78		448	10,67
	449	3,85		449	19,54
	455	4,31		455	14,48
	492	4,07		492	-6,98
	504	3,25		504	-110,17
	510	2,77		510	-171,70
	525	1,68		525	-335,55
	593	1,84		593	-380,30
	636	1,47		636	-462,68
	644	1,43		644	-468,47

Tabela A5 - Potencial e resistência de polarização linear (provete S1)

Provete	Dias	Rp (kOhm)	Dias	Ecorr (mV)		
		3 cm		Armadura	3 cm	1 cm
S1	0	0,93				
	14	0,67	14	44,27	3,58	63,67
	43	0,70	43	80,46	40,57	69,82
	63	0,75	63	78,75	42,56	73,98
	84	0,72	84	99,10	65,18	91,84
	93	0,71	93	95,25	64,92	86,57
	97	0,74	97	95,43	65,54	87,17
	141	0,77	141	90,04	65,92	103,81
	183	0,88	183	71,72	51,72	88,95
	191	0,89	191	70,46	49,88	89,85
	197	0,87	197	71,46	49,08	89,09
	205	0,87	205	73,39	50,48	91,64
	212	0,94	212	67,83	46,23	85,24
	219	0,96	219	66,53	44,25	84,34
	226	1,01	226	68,39	44,18	83,59
	233	1,08	233	65,13	42,50	82,03
	240	0,98	240	70,76	44,65	90,99
	250	1,08	250	63,92	39,37	81,95
	265	0,97	265	63,95	38,38	81,54
	278	0,97	278	62,55	37,75	80,90
	300	0,99	300	57,01	34,87	79,51
	329	0,92	329	55,47	33,15	-310,56
	408	0,80	408	43,41	-319,52	-301,84
	439	0,52	439	-111,90	-325,23	-308,20
	449	0,64	449	-53,22	-354,51	-297,66
	456	0,67	456	-10,26	-359,71	-304,47
	492	0,73	492	28,18	-363,76	-284,61
	504	0,78	504	47,11	-363,78	-283,21
	510	0,38	510	-235,95	-367,32	-321,19
	525	0,32	525	-287,81	-346,24	-326,60
	594	0,37	594	-341,79	-357,28	-358,22
	636	0,39	636	-350,56	-358,20	-324,56
	644	0,38	644	-350,26	-353,46	-337,69

Tabela A6 - Potencial e resistência de polarização linear (provete S2)

Provete	Dias	Rp (kOhm)		Dias	Ecorr (mV)
		3 cm			Armadura
S2	0	1,06		0	-54,94
	14	0,92		14	46,53
	43	0,86		43	44,65
	63	0,98		63	28,99
	84	0,91		84	49,01
	93	0,93		93	42,53
	97	0,96		97	44,81
	141	0,98		141	13,45
	183	1,18		183	26,58
	191	1,14		191	26,20
	197	1,10		197	23,73
	205	1,19		205	22,92
	212	1,19		212	15,95
	219	1,20		219	14,41
	226	1,13		226	12,84
	233	1,19		233	9,38
	240	1,16		240	13,53
	250	1,25		250	7,33
	265	1,22		265	6,34
	278	1,25		278	3,35
	300	1,14		300	4,02
	329	1,34		329	-1,60
	408	1,19		408	-20,85
	439	1,05		439	-20,38
	449	1,18		449	-20,61
	492	1,02		492	-19,54
	504	1,03		504	-17,61
	510	0,98		510	-19,54
	525	0,96		525	-19,44
	594	1,21		594	-260,52
	644	1,65		644	-192,80

Tabela A7 - Potencial e resistência de polarização linear (provete S3)

Provete	Dias	Rp (kOhm)		Dias	Ecorr (mV)
		3 cm			Armadura
S3	0	0,82		0	20,72
	14	0,60		14	55,13
	43	0,58		43	61,47
	63	0,64		63	59,12
	84	0,62		84	84,52
	93	0,65		93	75,57
	97	0,63		97	75,74
	141	0,74		141	72,41
	183	0,87		183	53,85
	191	0,91		191	56,24
	197	0,78		197	60,22
	205	0,83		205	49,50
	212	0,91		212	47,99
	219	0,88		219	48,80
	226	0,92		226	32,86
	233	0,99		233	36,39
	240	0,88		240	41,00
	250	0,97		250	39,49
	265	0,95		265	33,94
	278	0,99		278	36,48
	300	0,98		300	9,98
	329	1,08		329	25,22
	408	0,92		408	22,72
	439	0,92		439	17,03
	449	0,92		449	7,89
	456	0,96		456	11,89
	492	0,45		492	-202,50
	504	0,45		504	-203,86
	510	0,43		510	-236,31
	525	0,39		525	-233,74
	594	0,42		594	-291,56
	636	0,85		636	-211,72
	644	0,86		644	-172,92

Anexo B - Ensaios com sulfatos



Figura B1 - Os provetes.

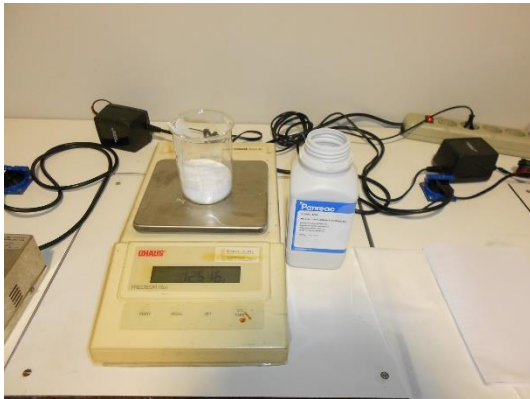


Figura B2 - A preparação da solução de sulfatos de sódio e de magnésio.



Figura B3 - Provetes em carga.

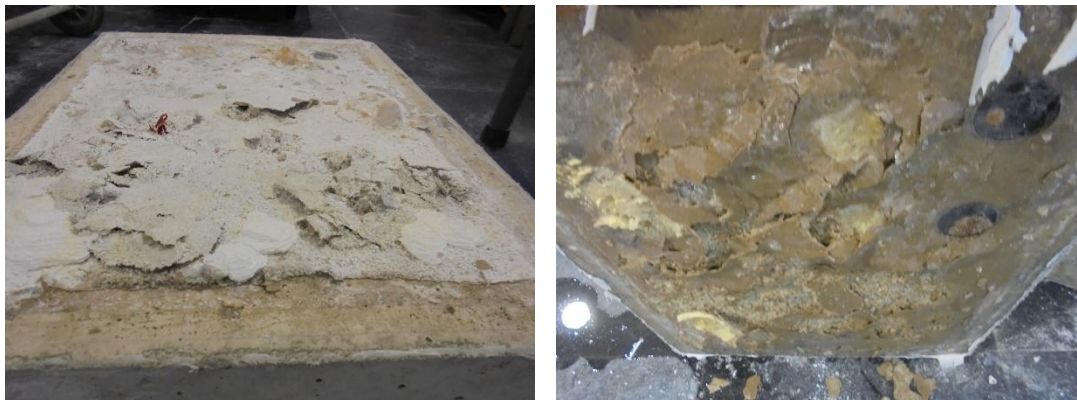


Figura B4 - Provetes após os ensaios.



Figura B5 - Provetes após remoção de camada superficial solta.

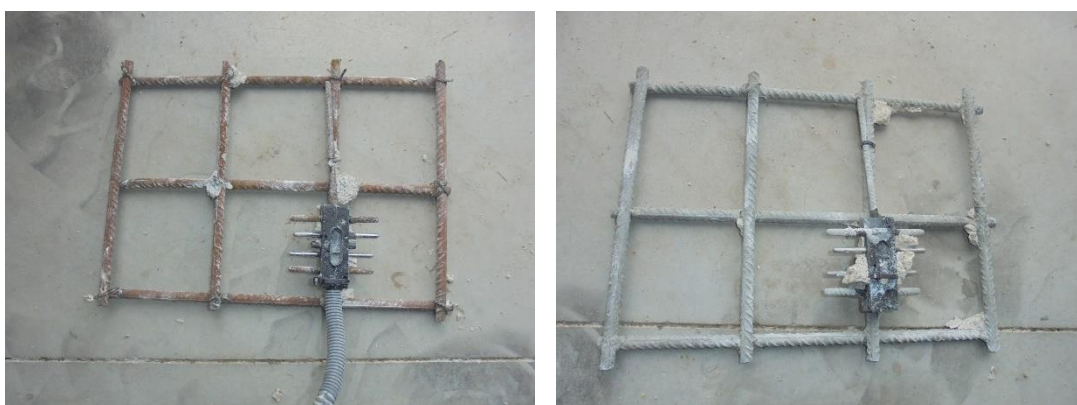


Figura B6 - Armaduras após os ensaios - armadura corrente e galvanizada.

Tabela B1 - Resistividade de betão, ao longo do ensaio em dias, a 10 e a 30 mm de profundidade

Resistividade (kOhm.cm)		
	1 cm	3 cm
0	12,8	6,8
6	21,4	4,1
16	15,5	
36	5,6	
48		3,2
167	6,3	4,3
177	6,5	4,6
202	7,4	5,9
211	6,2	5,1
219	7,1	5,6
224	7,3	5,8
230	13,5	7,6
237	8,9	5,7
247	8,9	9,5
271	9,2	9,1
278	9,4	9,3
288	9,3	9,5
307	15,2	12,0
315	15,0	13,9
328	20,0	
334	19,7	24,7
341	15,1	25,3
348	15,3	26,1
355	18,8	25,9
362	25,4	29,6
369	19,1	34,2
376	20,3	33,3
428		35,8
474	28,9	36,8
492	19,6	24,9
502	21,8	26,3
511		28,7
537	23,3	31,6
544	21,1	29,1
561	23,7	30,9
576	12,9	
597		39,6
715	26,0	49,2
750		49,2

Tabela B2 - Potencial de corrosão e resistência de polarização das armaduras galvanizadas ao longo do tempo de ensaio

Tempo (dias)	Temperatura (°C)	Ecorr (mV)	Rp kOhm
5	23,8	-242,9	6,61
21	20,7	-279,6	5,78
36	24,1	-295,0	5,14
40	19,8	-293,2	5,33
49	21,3	-294,8	5,18
118	26,0	-260,6	4,77
141	21,4	-253,87	401,50
160	25,0	-213,80	301,00
176	27,1	-243,51	374,30
176	30,0	-248,29	341,30
198	29,7	-243,95	333,50
203	28,0	-242,47	343,60
211	29,6	-243,67	306,30
218	30,8	-239,06	315,30
219	29,7	-239,11	319,50
222	30,3	-238,95	347,90
223	29,6	-237,52	323,70
232	32,8	-236,81	314,00
236	32,7	-236,47	315,30
246	33,1	-236,85	320,10
247	27,8	-235,16	328,60
272	29,5	-234,98	339,70
272	32,2	-235,52	324,40
280	30,6	-235,62	323,60
280	33,6	-235,42	337,60
296	31,3	-233,39	334,20
314	28,7	-209,62	270,20
331	24,9	-234,58	402,70
338	24,4	-231,47	418,20
348	26,5	-236,27	469,80
355	26,1	-240,22	477,40
369	16,0	-245,45	525,80
376	21,7	-240,74	490,60
383	22,5	-244,37	475,70
386	23,1	-244,11	449,40
404	19,6	-246,01	490,50
406	18,8	-246,45	467,60
411	19,6	-245,68	495,70
414	19,4	-247,03	483,00
420	19,0	-247,12	506,00
425	19,4	-248,70	482,50
428	18,3	-249,29	495,00
432	21,0	-250,38	503,50
434	20,6	-249,82	477,20
446	20,0	-251,22	464,60
448	21,3	-250,27	492,90
467	19,5	-251,47	479,30
497	22,4	-254,15	453,50
500	20,5	-253,28	437,50
525	25,6	-254,50	427,30
537	22,5	-254,02	471,90
539	24,3	-257,17	447,70
551	26,0	-268,72	393,10
593	32,9	-247,24	359,40
597	30,9	-246,84	365,10
723	20,0	-244,57	567,40
726	24,3	-246,00	567,00
737	24,2	-248,07	565,40

Tabela B3 - Potencial de corrosão e resistência de polarização das armaduras revestidas ao longo do tempo de ensaio

Tempo (dias)	Temperatura (°C)	Ecorr (mV)	Rp kOhm
5	21,9	-17,2	9,61
21	20,3	-18,4	6,22
35	22,3	-17,7	3,80
40	19,8	-16,8	3,59
49	20,2	-15,6	3,09
91	22,2	-10,2	2,31
141	22,3	-13,86	54,80
160	23,7	-12,98	49,20
169	29,7	-11,64	33,80
176	28,8	-15,42	36,70
197	28,9	7,73	35,10
202	29,3	17,88	36,90
210	32,8	28,08	24,10
218	29,5	31,03	24,00
219	29,2	30,68	23,90
222	28,5	29,73	24,80
223	28,2	29,57	25,20
232	32,8	33,54	21,90
232	35,3	34,27	20,80
246	31,2	30,71	51,10
247	33,3	30,60	51,90
271	31,6	30,86	48,40
272	31,3	30,74	48,00
279	32,6	31,27	48,80
280	32,7	31,57	48,80
293	34,2	30,58	59,60
308	28,2	25,92	82,00
317	30,3	26,29	141,40
330	26,4	1,56	147,50
338	25,5	-5,64	153,00
341	24,4	-7,13	155,00
348	23,6	-10,31	152,10
355	22,3	-10,74	146,30
362	24,1	-11,69	141,30
381	21,2	-13,71	144,40
383	22,3	-13,04	140,60
386	22,0	-12,63	124,70
404	19,3	-13,70	135,40
406	19,5	-12,92	130,00
420	18,8	-13,62	135,80
464	21,7	-9,51	106,70
497	22,6	63,38	98,00
597	30,8	28,99	77,90
673	29,5	21,27	179,70
677	28,8	20,13	189,80
723	20,7	7,60	248,30
737	19,8	1,98	293,50

Tabela B4 - Potencial de corrosão e resistência de polarização das armaduras sem proteção ao longo do tempo de ensaio

Tempo (dias)	Temperatura (°C)	Ecorr (mV)	Rp kOhm
5	25,1	-60,6	4,88
21	22,0	-66,6	5,41
36	23,6	-59,3	5,86
40	21,7	-58,7	5,95
49	23,0	-61,2	5,89
118	26,7	-72,7	5,29
141	22,5	-76,73	57,00
160	25,3	-99,65	3,07
176	27,6	12,34	52,90
176	29,2	12,51	52,30
198	30,6	2,46	50,50
203	28,2	-0,68	59,30
211	29,9	0,77	55,90
218	31,1	3,25	58,30
219	30,0	1,40	58,40
222	30,8	-1,00	58,20
223	29,1	-1,25	59,10
232	34,6	0,11	55,30
236	33,8	1,67	55,00
246	33,4	-8,13	55,30
247	30,4	-9,85	55,80
272	30,2	-9,07	55,40
272	32,4	-8,91	55,10
280	31,4	-9,23	54,50
280	34,2	-8,97	54,40
296	32,3	-9,50	54,70
309	28,1	-16,05	60,20
320	28,4	-20,32	65,70
331	25,5	-22,04	63,40
338	25,6	-25,54	65,70
348	26,7	-27,15	68,00
362	23,2	-28,28	68,80
383	21,7	-30,77	70,60
383	22,6	-30,82	70,30
386	23,7	-30,66	70,30
404	19,8	-33,78	72,90
411	21,3	-33,97	73,20
425	19,9	-35,72	74,20
428	16,3	-35,15	73,50
432	20,8	-35,45	72,60
464	22,4	-36,70	72,70
597	31,6	-42,20	59,50
673	29,8	-57,59	64,30
677	29,8	-58,95	64,60
723	20,8	-71,25	74,90
726	24,9	-72,68	72,40
737	24,7	-73,60	74,10
1009	32,5	-79,66	221,40

Tabela B5 - Resistência de polarização das armaduras protegidas catodicamente, galvanizadas, revestidas e sem proteção ao longo do ensaio

Resistência de polarização (kOhm)				
	Provete 3	Provete 6	Provete 9	Provete 12
Dias	Prot. Catódica	Galvanizada	Revestida	Sem proteção
5	0,87	6,61	9,61	4,88
21	0,75	5,78	6,22	5,41
35	0,71		3,80	
36		5,14		5,86
40	0,73	5,33	3,59	5,95
49	0,72	5,18	3,09	5,89
91	0,68		2,31	
118		4,77		5,29
141	6,75	401,50	54,80	57,00
160	6,54	301,00	49,20	3,07
169	7,42		33,80	
176	6,79	374,30	36,70	52,90
176		341,30		52,30
197	6,33		35,10	
198		333,50		50,50
202	6,38		36,90	
203		343,60		59,30
210	6,26		24,10	
211		306,30		55,90
218	6,83	315,30	24,00	58,30
219	7,13	319,50	23,90	58,40
222	7,29	347,90	24,80	58,20
223	7,48	323,70	25,20	59,10
232	7,07	314,00	21,90	55,30
232	6,94		20,80	
236		315,30		55,00
246	7,12	320,10	51,10	55,30
247	6,98	328,60	51,90	55,80
271	6,82		48,40	
272	6,66	339,70	48,00	55,40
272		324,40		55,10
279	6,57		48,80	
280	6,71	323,60	48,80	54,50
280		337,60		54,40
293	6,52		59,60	
296		334,20		54,70
308	7,02		82,00	
309				60,20
313	7,02			
314		270,20		
317	7,09		141,40	
320				65,70
330	7,39		147,50	
331		402,70		63,40
338	7,95	418,20	153,00	65,70
341	8,12		155,00	

Resistência de polarização (kOhm)				
	Provete 3	Provete 6	Provete 9	Provete 12
Dias	Prot. Catódica	Galvanizada	Revestida	Sem proteção
348	8,28	469,80	152,10	68,00
355	8,53	477,40	146,30	
362	8,69		141,30	68,80
369	9,58	525,80		
376	10,00	490,60		
380	9,92			
381			144,40	
383	9,95	475,70	140,60	70,60
383				70,30
386	9,98	449,40	124,70	70,30
404	10,50	490,50	135,40	72,90
405	10,60			
406		467,60	130,00	
411	10,50	495,70		73,20
414		483,00		
418	11,00			
420	10,20	506,00	135,80	
425	10,20	482,50		74,20
425	10,20			
428		495,00		73,50
432	10,30	503,50		72,60
434	10,20	477,20		
446	10,30	464,60		
448	10,40	492,90		
464	10,10		106,70	72,70
467	10,20	479,30		
474	10,40			
495	10,60			
497	8,92	453,50	98,00	
500		437,50		
511	6,79			
525	7,08	427,30		
537		471,90		
539	7,02	447,70		
544	6,65			
551	5,99	393,10		
561	5,42			
593	2,50	359,40		
597	2,59	365,10	77,90	59,50
673			179,70	64,30
677	3,62		189,80	64,60
723	6,06	567,40	248,30	74,90
726		567,00		72,40
737	6,66	565,40	293,50	74,10
1009	25,30			221,40

Tabela B6 - Potencial de corrosão das armaduras protegidas catodicamente, galvanizadas, revestidas e sem proteção ao longo do ensaio

Potencial de corrosão (mV)				
	Provete 3	Provete 6	Provete 9	Provete 12
	Prot. Catódica	Galvanizada	Revestida	Sem proteção
5	-69,60	-242,87	-0,43	-60,65
21	-57,08	-279,60	-8,42	-66,62
35	-54,12		-11,31	
36		-294,97		-59,34
37	-53,58			
40		-293,20	-10,91	-58,68
49	-49,07	-294,76	-11,79	-61,18
91			-11,66	
118		-260,62		-72,73
141	-36,05	-253,87	-13,86	-76,73
160	-43,93	-213,80	-12,98	-99,65
169	-24,97		-11,64	
176	-19,69	-243,51	-15,42	12,34
176		-248,29		12,51
197	-6,90		7,73	
198		-243,95		2,46
202	-5,47		17,88	
203		-242,47		-0,68
210	3,70		28,08	
211		-243,67		0,77
218	-2,27	-239,06	31,03	3,25
219	5,08	-239,11	30,68	1,40
222	3,38	-238,95	29,73	-1,00
223	3,87	-237,52	29,57	-1,25
230	6,88			
232	9,24	-236,81	33,54	0,11
232			34,27	
236		-236,47		1,67
246	8,07	-236,85	30,71	-8,13
247	7,90	-235,16	30,60	-9,85
271	-3,11		30,86	
272	-2,96	-234,98	30,74	-9,07
272		-235,52		-8,91
279	-12,65		31,27	
280	-14,89	-235,62	31,57	-9,23
280		-235,42		-8,97
293	-10,79		30,58	
296		-233,39		-9,50
299	-9,11			
300	-17,17			
300	-15,19			
308			25,92	
309				-16,05
314		-209,62		
317	-8,51		26,29	
320				-20,32
330	-14,25		1,56	
331		-234,58		-22,04
334	-15,11			

Potencial de corrosão (mV)				
	Provete 3	Provete 6	Provete 9	Provete 12
	Prot. Catódica	Galvanizada	Revestida	Sem proteção
338		-231,47	-5,64	-25,54
341	-13,67		-7,13	
348	-15,44	-236,27	-10,31	-27,15
355	-17,62	-240,22	-10,74	
362	-27,44		-11,69	-28,28
369	-27,04	-245,45		
376	-36,97	-240,74		
380	-36,67			
381			-13,71	
383	-34,45	-244,37	-13,04	-30,77
383				-30,82
386	-33,57	-244,11	-12,63	-30,66
404	-25,23	-246,01	-13,70	-33,78
404	-24,54			
406		-246,45	-12,92	-33,97
411	-23,83	-245,68		
414		-247,03		
418	-22,81			
420		-247,12	-13,62	
425	-21,47	-248,70		-35,72
425	-20,92			
428		-249,29		-35,15
432	-19,97	-250,38		-35,45
434		-249,82		
446	-31,99	-251,22		
448		-250,27		
464	-23,05		-9,51	-36,70
467	-30,21	-251,47		
474	-20,87			
483	-19,76			
492	-22,28			
497	-15,52	-254,15	63,38	
500		-253,28		
513	-10,46			
525	-13,90	-254,50		
537		-254,02		
539	-15,34	-257,17		
544	-14,37			
551	-15,33	-268,72		
561	-15,41			
593	-7,79	-247,24		
597	-7,99	-246,84	28,99	-42,20
673	-17,88		21,27	-57,59
677	-18,20		20,13	-58,95
723	-63,33	-244,57	7,60	-71,25
737	-88,09	-246,00	1,98	-72,68
737		-248,07		-73,60
902	-56,06			
1009	-48,97			-79,66

Tabela B7 - Potencial de corrosão nas diferentes camadas para as armaduras galvanizadas ao longo do tempo

Tempo (dias)	Armadura	3 cm	1 cm
5	-242,9	-150,9	-276,2
21	-279,6	-159,6	-343,5
36	-295,0	-160,9	-355,8
40	-293,2	-158,3	-350,0
49	-294,8	-156,9	-346,4
118	-260,6	-123,7	-311,7
141	-253,8	-121,4	-306,9
160	-213,6	-86,4	-250,5
176	-243,5	-119,0	-303,1
176	-248,3	-119,5	-309,9
198	-243,9	-112,7	-302,5
203	-242,5	-109,3	-300,1
211	-243,7	-113,7	-305,0
218	-239,0	-109,0	-300,9
219	-239,1	-109,2	-301,5
222	-238,8	-109,8	-302,6
223	-237,5	-108,6	-301,1
232	-236,7	-121,5	-305,3
236	-236,4	-120,0	-305,4
246	-236,8	-115,6	-306,0
247	-234,7	-114,9	-305,4
272	-235,0	-113,1	-308,5
272	-235,4	-113,9	-309,4
280	-235,5	-115,4	-310,7
280	-235,4	-115,8	-311,0
296	-233,6	-115,2	-311,6
314	-211,6	-73,3	-233,6
331	-236,0	-112,4	-308,9
338	-231,5	-111,3	-307,5
348	-236,3	-108,1	-306,7
355	-243,1	-108,5	-306,6
369	-247,0	-110,7	-304,0
376	-240,8	-113,9	-309,4
383	-244,5	-116,9	-315,0
386	-244,1	-117,3	-316,2
404	-245,9	-119,4	-314,6
406	-246,2	-119,3	-316,2
411	-245,5	-115,5	-315,1
414	-246,8	-116,0	-316,5
420	-247,1	-114,1	-313,6
425	-248,7	-114,8	-318,3
428	-249,1	-115,5	-319,8
432	-250,2	-115,3	-322,1
434	-249,9	-114,9	-321,2
446	-251,0	-115,5	-324,2
448	-250,0	-114,7	-323,3
467	-251,2	-114,5	-326,4
497	-254,0	-120,8	-331,6
500	-253,1	-120,7	-330,9
525	-253,9	-122,0	-335,5
537	-253,8	-117,9	-332,0
539	-256,7	-119,8	-334,9
551	-268,5	-121,6	-339,9
593	-247,2	-121,5	-337,6
597	-246,7	-122,1	-337,6
723	-244,4	-127,2	-336,1
726	-245,7	-128,2	-338,0
737	-247,5	-130,8	-341,3

Tabela B8 - Potencial de corrosão nas diferentes camadas para as armaduras sem proteção em função do tempo

Tempo (dias)	Armadura	3 cm	1 cm
5	-60,6	-58,6	61,7
21	-66,6	-64,4	-20,1
36	-59,3	-56,8	88,6
40	-58,7	-56,2	29,2
49	-61,2	-55,0	-31,8
118	-72,7	-60,3	45,4
141	-76,7	-69,1	5,9
160	-99,5	-107,6	-20,4
176	12,3	21,6	41,3
176	12,5	21,7	86,3
198	2,4	11,5	37,8
203	-0,7	7,6	-25,5
211	0,8	9,2	8,6
218	3,3	4,6	31,8
219	1,4	4,8	161,8
222	-1,0	4,4	29,8
223	-1,2	4,2	30,9
232	0,1	6,9	26,2
236	1,7	8,1	-3,5
246	-8,1	-4,0	15,2
247	-9,8	-5,8	31,2
272	-9,1	-7,0	-8,8
272	-9,1	-7,0	65,0
280	-9,2	-6,7	22,1
280	-9,0	-6,7	30,3
296	-9,5	-7,5	29,5
309	-16,3	-12,5	52,7
320	-20,3	-18,2	30,5
331	-22,0	-20,4	62,9
338	-25,5	-23,0	165,3
348	-27,1	-25,4	-66,9
362	-28,3	-26,6	-68,3
383	-30,7	-31,5	-89,2
383	-30,8	-31,4	17,3
386	-30,7	-31,0	-131,8
404	-33,8	-34,6	57,6
411	-34,0	-35,0	-70,9
425	-35,7	-37,2	225,0
428	32,2	32,0	30,9
432	-35,4	-36,6	13,0
464	-36,7	-37,7	16,9
597	-42,2	-41,6	-13,1
673	-57,6	-56,2	8,5
677	-59,0	-57,6	22,7
723	-71,3	-70,8	2,6
726	-72,7	-73,0	19,7
737	-73,6	-73,5	18,1
1009	-69,7	-62,1	78,3

Anexo C - Ensaaios na ETAR



Figura C1 - Preparação da instalação dos sensores (caixa de recirculação de lamas).



Figura C2 - Instalação dos sensores (caixa de recirculação de lamas).



Figura C3 - Preparação da instalação dos sensores (Decantador secundário).



Figura C4 - Sensores acados de instalar (Decantador secundário).



Figura C5 - Extração de carotes (Poço de recirculação de lamas).



Figura C6 - Carote extraído para análise do nível de contaminação e amostras para analisar com o XRF.

Tabela C1 - Resistividade iónica do betão ao longo do ensaio

Data	Poço de recirculação de lammas		Caixa de recirculação de lammas		Decantador secundário	
	PRL 1cm	PRL 3cm	CRL 1cm	CRL 3cm	DS 1cm	DS 3cm
09/06/11	0,2	0,6			0,2	0,6
09/06/11	0,9		0,7	0,7	1,0	0,9
09/06/11	0,9		0,8	0,7	1,0	0,9
09/06/11	1,0		0,7	0,7	1,0	0,9
10/06/11	1,1		0,8	0,7	1,1	0,9
11/06/11	1,1		0,8	0,8	1,1	1,0
12/06/11	1,1		0,8	0,8	1,1	1,0
13/06/11	0,2	0,7	0,1	0,6	0,2	0,7
13/06/11	0,4	1,8	0,1	1,0		
30/06/11	0,2	0,7	0,2	1,2	0,3	
05/07/11	0,5	2,5	0,2	1,9		
06/07/11	0,5	2,0	0,2	1,8		
07/07/11	0,5	1,6	0,2	1,9		
08/07/11	0,5	1,7	0,2	1,7		
09/07/11	0,5	1,7	0,2	1,6	0,4	1,5
10/07/11	0,5	1,7	0,2	1,5	0,4	1,5
11/07/11	0,5	1,4	0,2	1,3	0,4	1,4
12/07/11	0,6	1,5	0,2	1,5	0,4	1,4
13/07/11	0,6	1,5	0,2	1,5	0,4	1,4
14/07/11	0,5	1,5	0,2	1,4	0,4	1,4
15/07/11	0,5	1,5	0,2	1,5	0,4	1,4
16/07/11	0,5	1,5	0,2	1,5	0,4	1,3
17/07/11	0,6	1,4	0,2	1,3	0,4	1,3
18/07/11	0,6	1,4	0,2	1,3	0,4	1,2
19/07/11	0,7	1,4	0,2	1,3	0,4	1,3
20/07/11	0,6	1,5	0,3	1,4	0,5	1,3
21/07/11	0,6	1,4	0,3	1,4	0,5	1,3
22/07/11	0,7	1,4	0,4	1,4	0,5	1,3
23/07/11	0,8	1,4	0,3	1,3	0,5	1,3
24/07/11	0,8	1,4	0,4	1,4	0,5	1,3
25/07/11	0,8	1,4	0,4	1,4	0,5	1,3
26/07/11	0,8	1,4	0,4	1,4	0,5	1,3
27/07/11	0,9	1,5	0,4	1,4	0,5	1,4
28/07/11	0,9	1,5	0,4	1,4	0,5	1,3
29/07/11	0,9	1,4	0,4	1,3	0,5	1,3
30/07/11	1,0	1,4	0,4	1,3	0,5	1,2
31/07/11	1,0	1,4	0,4	1,3	0,5	1,2
01/08/11	0,8	0,9	0,2	0,9	0,3	0,9
02/08/11		2,0			0,4	
03/08/11	2,7	2,1				
04/08/11	1,5	1,0	0,3	1,3	0,3	1,2
04/08/11	1,7	2,1	0,4	2,3		
05/08/11	1,5	1,9	0,4	2,2	0,4	1,9
06/08/11	1,5	2,0	0,3	2,0	0,4	1,7
07/08/11	1,3	1,7	0,4	1,7	0,4	1,7
08/08/11	1,2	1,6	0,4	1,6	0,5	1,5
09/08/11	1,2	1,6	0,4	1,6	0,5	1,5
10/08/11	1,2	1,6	0,4	1,6	0,5	1,5
11/08/11	1,2	1,5	0,4	1,5	0,5	1,5
12/08/11	1,2	1,4	0,4	1,4	0,5	1,3
13/08/11	1,2	1,4	0,4	1,4	0,5	1,3
14/08/11	1,2	1,4	0,4	1,4	0,5	1,4
15/08/11	1,2	1,5	0,4	1,4	0,5	1,3
16/08/11	1,2	1,4	0,4	1,4	0,5	1,3
17/08/11	1,2	1,4	0,4	1,4	0,5	1,3
18/08/11	1,2	1,4	0,4	1,3	0,5	1,2
19/08/11	1,3	1,5	0,4	1,4	0,5	1,4
20/08/11	1,2	1,4	0,4	1,4	0,5	1,3
21/08/11	1,2	1,3	0,3	1,2	0,5	1,2
22/08/11	1,2	1,4	0,3	1,3	0,5	1,2
23/08/11	1,2	1,3	0,3	1,2	0,5	1,2
24/08/11	1,3	1,4	0,3	1,3	0,5	1,2
25/08/11	1,2	1,3	0,3	1,2	0,5	1,2
26/08/11	1,2	1,3	0,3	1,2	0,5	1,1
27/08/11	1,3	1,4	0,3	1,3	0,5	1,2
28/08/11	1,2	1,4	0,3	1,3	0,5	1,2
29/08/11	1,1	1,4	0,3	1,3	0,5	1,1

30/08/11	1,0	1,2	0,3	1,2	0,5	1,1
19/11/11					0,4	0,7
20/11/11		0,7	0,3	0,7	0,4	0,7
21/11/11		0,7	0,3	0,7	0,3	0,7
22/11/11		0,6	0,2	0,5	0,3	0,5
23/11/11		0,7	0,2	0,6	0,3	0,6
24/11/11		0,7	0,2	0,7	0,3	0,7
25/11/11		0,7	0,2	0,7	0,3	0,7
26/11/11		0,6	0,2	0,6	0,3	0,6
27/11/11		0,6	0,2	0,6	0,3	0,6
28/11/11		0,6	0,2	0,6	0,3	0,5
29/11/11		0,6	0,2	0,6	0,3	0,5
30/11/11		0,6	0,2	0,6	0,3	0,5
01/12/11		0,7	0,2	0,6	0,3	0,6
02/12/11		0,6	0,2	0,6	0,3	0,5
03/12/11		0,6	0,2	0,5	0,3	0,5
04/12/11		0,6	0,2	0,6	0,3	0,6
05/12/11		0,6	0,2	0,6	0,3	0,6
06/12/11		0,7	0,2	0,6	0,3	0,6
07/12/11		0,5	0,2	0,5	0,3	0,5
08/12/11		0,6	0,2	0,6	0,3	0,6
09/12/11		0,6	0,2	0,6	0,3	0,6
10/12/11		0,6	0,2	0,6	0,3	0,5
11/12/11		0,6	0,3	0,6	0,3	0,6
12/12/11		0,7	0,3	0,6	0,3	0,6
13/12/11		0,7	0,3	0,7	0,4	0,6
14/12/11		0,7	0,3	0,7	0,3	0,6
15/12/11		0,6	0,2	0,6	0,3	0,6
16/12/11		0,7	0,3	0,7	0,4	0,6
17/12/11		0,5	0,2	0,5	0,3	0,5
18/12/11		0,5	0,2	0,5	0,2	0,4
19/12/11		0,4	0,1	0,4	0,2	0,4
20/12/11		0,5	0,2	0,5	0,3	0,5
21/12/11		0,6	0,2	0,6	0,3	0,5
22/12/11		0,6	0,2	0,6	0,3	0,5
23/12/11		0,5	0,2	0,5	0,3	0,5
24/12/11		0,6	0,2	0,6	0,3	0,5
25/12/11		0,5	0,2	0,5	0,3	0,5
26/12/11		0,5	0,2	0,5	0,3	0,5
27/12/11		0,5	0,2	0,5	0,3	0,5
28/12/11		0,5	0,2	0,5	0,3	0,5
29/12/11		0,6	0,2	0,6	0,3	0,6
30/12/11		0,5	0,2	0,5	0,2	0,4
31/12/11		0,5	0,2	0,5	0,3	0,5
01/01/12		0,6	0,2	0,6	0,3	0,6
02/01/12		0,6	0,2	0,6	0,3	0,5
03/01/12		0,5	0,2	0,5	0,3	0,5
04/01/12		0,6	0,2	0,6	0,3	0,5
05/01/12		0,5	0,2	0,5	0,3	0,5
06/01/12		0,5	0,2	0,5	0,3	0,5
07/01/12		0,6	0,2	0,5	0,3	0,5
08/01/12		0,5	0,2	0,5	0,3	0,5
09/01/12		0,5	0,2	0,5	0,2	0,5
10/01/12		0,5	0,2	0,5	0,2	0,5
11/01/12		0,5	0,2	0,5	0,3	0,5
12/01/12		0,6	0,2	0,6	0,3	0,5
13/01/12		0,6	0,3	0,6	0,3	0,5
14/01/12		0,6	0,4	0,6	0,3	0,6
15/01/12		0,6	0,4	0,6	0,3	0,5
16/01/12		0,5	0,4	0,5	0,3	0,5
17/01/12		0,6	0,4	0,6	0,3	0,5
18/01/12		0,6	0,3	0,6	0,3	0,5
04/02/12	0,1	0,4			0,2	0,4
05/02/12	0,1	0,6	0,2	0,6	0,3	0,5
06/02/12	0,1	0,7	0,3	0,7	0,3	0,6
07/02/12	0,1	0,7	0,3	0,7	0,3	0,6
08/02/12	0,1	0,6	0,2	0,6	0,3	0,5
09/02/12	0,1	0,5	0,2	0,5	0,2	0,4
10/02/12	0,1	0,6	0,2	0,6	0,3	0,5
11/02/12	0,1	0,5	0,2	0,5	0,3	0,5
12/02/12	0,1	0,5	0,2	0,5	0,3	0,5
13/02/12			0,2	0,6	0,3	0,6
14/02/12	0,1	0,6	0,2	0,6	0,3	0,5
15/02/12	0,1	0,6	0,2	0,6	0,3	0,5
16/02/12	0,1	0,7	0,2	0,7	0,3	0,6

17/02/12	0,1	0,7	0,2	0,7	0,3	0,6
18/02/12	0,1	0,6	0,2	0,6	0,3	0,6
19/02/12	0,1	0,6	0,2	0,6	0,3	0,6
20/02/12	0,1	0,6	0,2	0,6	0,3	0,5
21/02/12	0,2	0,6	0,3	0,6	0,3	0,5
22/02/12	0,2	0,6	0,4	0,6	0,3	0,6
23/02/12	0,2	0,7	0,3	0,6	0,3	0,6
24/02/12	0,2	0,7	0,4	0,7	0,3	0,6
25/02/12	0,2	0,7	0,5	0,7	0,3	0,6
26/02/12	0,2	0,8	0,5	0,7	0,3	0,7
27/02/12	0,2	0,8	0,5	0,7	0,3	0,7
28/02/12	0,2	0,8	0,4	0,8	0,4	0,7
29/02/12	0,2	0,8	0,3	0,8	0,3	0,7
01/03/12	0,2	0,8	0,3	0,8	0,4	0,7
02/03/12	0,3	0,8	0,3	0,8	0,4	0,8
03/03/12	0,3	0,9	0,3	0,9	0,4	0,8
04/03/12	0,3	0,8	0,3	0,8	0,4	0,8
05/03/12	0,2	0,8	0,3	0,8	0,3	0,7
06/03/12	0,2	0,8	0,3	0,8	0,4	0,8
07/03/12	0,2	0,6			0,4	0,8
08/04/12	0,2	1,0	0,9	1,0	0,5	0,9
09/04/12	0,2	1,1	1,0	1,1	0,5	1,0
10/04/12	0,2	0,8	0,4	0,8	0,4	0,8
11/04/12	0,2	0,8	0,4	0,8	0,4	0,8
12/04/12	0,2	0,9	0,4	0,8	0,4	0,8
13/04/12	0,1	0,7	0,3	0,7	0,3	0,7
14/04/12	0,1	0,7	0,3	0,7	0,3	0,6
15/04/12	0,1	0,8	0,3	0,8	0,4	0,7
16/04/12	0,1	1,0	0,3	0,9	0,4	0,8
17/04/12	0,1	0,9	0,3	0,9	0,4	0,8
18/04/12	0,1	0,8	0,3	0,8	0,4	0,7
19/04/12	0,1	0,8	0,3	0,8	0,4	0,8
20/04/12	0,2	0,9	0,3	0,9	0,4	0,8
21/04/12	0,2	0,9	0,3	0,9	0,4	0,8
22/04/12	0,1	0,9	0,2	0,9	0,4	0,8
23/04/12	0,2	0,9	0,2	0,9	0,4	0,8
24/04/12	0,2	1,0	0,3	1,0	0,4	0,9
25/04/12	0,2	0,7	0,2	0,7	0,3	0,7
26/04/12	0,2	0,8	0,2	0,8	0,4	0,7
27/04/12	0,2	0,7	0,2	0,7	0,3	0,7
28/04/12	0,1	0,7	0,2	0,7	0,3	0,7
29/04/12	0,1	0,8	0,2	0,8	0,4	0,7
30/04/12	0,1	0,9	0,2	0,9	0,4	0,8
01/05/12	0,1	0,8	0,2	0,7	0,4	0,7
02/05/12	0,1	0,8	0,2	0,8	0,4	0,7
03/05/12	0,1	0,9	0,2	0,8	0,4	0,7
04/05/12	0,1	0,9	0,2	0,9	0,4	0,8
05/05/12	0,1	1,0	0,2	0,9	0,4	0,9
06/05/12	0,1	1,0	0,3	1,0	0,5	0,9
07/05/12	0,1	0,9	0,2	0,8	0,4	0,8
08/05/12	0,1	1,2	0,3	1,2	0,5	1,0
09/05/12	0,1	1,6	0,4	1,7	0,6	1,4
10/05/12	0,1	1,6	0,4	1,7	0,6	1,4
11/05/12	0,1	1,5	0,3	1,5	0,5	1,3
12/05/12	0,1	1,6	0,4	1,7	0,6	1,4
13/05/12	0,1	1,6	0,4	1,6	0,6	1,4
14/05/12	0,1	1,6	0,4	1,7	0,6	1,4
15/05/12	0,1	1,7	0,4	1,8	0,6	1,5
16/05/12	0,1	1,7	0,4	1,8	0,6	1,5
17/05/12	0,1	0,9	0,2	0,9	0,4	0,8
18/05/12	0,1	1,1	0,3	1,2	0,4	1,0
19/05/12	0,1	1,1	0,3	1,1	0,4	0,9
20/05/12	0,1	0,9	0,3	1,0	0,4	0,8
21/05/12	0,1	0,9	0,2	0,9	0,3	0,8
22/05/12	0,1	1,0	0,2	1,1	0,4	0,9
23/05/12	0,1	1,2	0,3	1,2	0,4	1,1
24/05/12	0,1	1,2	0,3	1,3	0,5	1,1
25/05/12	0,1	1,3	0,3	1,3	0,5	1,1
26/05/12	0,1	1,1	0,3	1,1	0,4	1,0
27/05/12	0,1	1,1	0,3	1,1	0,4	1,0
28/05/12	0,1	1,1	0,3	1,1	0,4	1,0
29/05/12	0,1	1,1	0,3	1,1	0,4	1,0
30/05/12	0,1	1,2	0,3	1,2	0,4	1,1
31/05/12	0,2	1,3	0,3	1,0	0,5	1,2
01/06/12	0,1	1,4	0,4	0,8	0,5	1,3

02/06/12	0,2	1,4	0,7	0,8	0,5	1,2
03/06/12	0,2	1,3	0,9	0,8	0,4	1,2
04/06/12	0,2	1,2	0,9	0,8	0,4	1,1
05/06/12	0,2	1,3			0,4	1,1
06/06/12	0,2	1,3	1,0	0,9	0,5	1,2
07/06/12	0,2	1,2	1,0	1,0	0,4	1,1
08/06/12	0,2	1,1	0,5	0,9	0,4	1,0
09/06/12	0,2	1,1	0,5	0,9	0,4	1,0
10/06/12	0,2	1,3	0,5	1,1	0,5	1,1
11/06/12	0,2	1,3	0,4	1,1	0,4	1,1
12/06/12	0,2	1,1	0,4	0,9	0,4	1,0
13/06/12	0,2	1,2	0,4	1,0	0,4	1,1
14/06/12	0,2	1,1	0,4	1,0	0,4	1,0
15/06/12	0,3	1,2	0,4	1,1	0,4	1,1
16/06/12	0,3	1,2	0,4	1,1	0,4	1,1
17/06/12	0,3	1,3	0,4	1,1	0,4	1,1
18/06/12	0,4	2,1	0,5	1,6	0,3	0,0
19/06/12	0,3	1,1	0,4	1,1	0,4	1,1
20/06/12	0,3	1,1	0,4	1,1	0,4	1,0
21/06/12	0,4	1,2	0,4	1,2	0,4	1,1
22/06/12	0,3	1,1	0,4	1,1	0,4	1,0
23/06/12	0,3	1,1	0,4	1,1	0,4	1,0
24/06/12	0,3	1,2	0,4	1,2	0,4	1,1
25/06/12	0,3	1,3	0,4	1,3	0,5	1,3
26/06/12	0,3	1,4	0,5	1,5	0,5	1,8
27/06/12	0,4	2,0	0,5	1,7	0,4	2,4
28/06/12	0,3	1,3	0,4	1,3	0,4	1,2
29/06/12	0,4	1,0	0,4	1,0	0,4	1,0
25/07/12	0,5	0,7	0,3	0,5	0,4	0,8
27/07/12	0,9	2,0				
28/07/12	0,8	3,0	0,4	1,1	0,5	2,4
29/07/12	0,7	2,8	0,4	1,0	0,5	2,3
30/07/12	0,8	2,8	0,4	1,0	0,5	2,2
31/07/12	0,8	2,8	0,4	1,0	0,5	2,3
01/08/12	0,7	1,6	0,4	0,8	0,5	1,4
02/08/12	0,7	1,7	0,4	0,9	0,5	1,5
03/08/12	0,7	1,6	0,4	0,8	0,5	1,4
04/08/12	0,7	1,7	0,4	0,8	0,5	1,5
05/08/12	0,7	1,7	0,4	0,8	0,5	1,5
06/08/12	0,8	1,5	0,3	0,8	0,5	1,3
07/08/12	0,7	1,5	0,3	0,8	0,5	1,4
08/08/12	0,7	1,6	0,4	0,7	0,5	1,5
09/08/12	0,8	1,8	0,4	0,7	0,6	1,6
10/08/12	0,8	1,8	0,5	0,7	0,6	1,7
11/08/12	0,8	1,8	0,4	0,6	0,5	1,6
12/08/12	0,8	1,6	0,4	0,6	0,5	1,4
13/08/12	0,8	1,6	0,4	0,5	0,5	1,4
14/08/12	0,9	1,7	0,4	0,6	0,5	1,5
15/08/12	0,8	1,5	0,4	0,5	0,4	1,3
16/08/12	0,9	1,6	0,4	0,6	0,4	1,3
17/08/12	0,8	1,6	0,4	0,6	0,5	1,4
18/08/12	0,8	1,6	0,4	0,7	0,5	1,4
19/08/12	0,9	1,7	0,4	0,7	0,5	1,4
20/08/12	1,0	1,8	0,4	0,8	0,5	1,5
21/08/12	1,0	1,8	0,4	0,7	0,5	1,6
22/08/12	0,9	1,7	0,4	0,7	0,5	1,5
23/08/12	1,0	1,7	0,4	0,7	0,5	1,5
24/08/12	0,9	1,6	0,4	0,6	0,4	1,4
25/08/12	0,9	1,7	0,4	0,7	0,5	1,4
26/08/12	0,8	1,5	0,3	0,6	0,4	1,3
27/08/12	0,9	1,6	0,3	0,7	0,5	1,4
28/08/12	1,0	1,7	0,4	0,7	0,5	1,4
29/08/12	0,6	1,5	0,3	0,7	0,5	1,4
02/09/12					0,7	2,4
03/09/12	1,0	2,8	0,3	0,8	0,6	2,2
04/09/12	1,2	3,2	0,4	0,8	0,7	2,4
05/09/12	1,2	3,1	0,4	0,8	0,6	2,3
06/09/12	1,3	3,3	0,4	0,7	0,6	2,4
07/09/12	1,4	3,4	0,4	0,8	0,6	2,5
08/09/12	1,4	3,3	0,4	0,7	0,6	2,4
09/09/12	1,3	3,3	0,4	0,7	0,6	2,4
10/09/12	1,4	3,3	0,4	0,7	0,6	2,3
11/09/12	1,2	3,0	0,4	0,6	0,6	2,2
12/09/12	1,1	3,0	0,4	0,7	0,6	2,2
13/09/12	1,1	3,2	0,4	0,7	0,7	2,3

14/09/12	1,1	3,0	0,3	0,7	0,6	2,1
15/09/12	1,1	2,9	0,3	0,7	0,6	2,1
16/09/12	1,2	3,0	0,3	0,7	0,6	2,2
17/09/12	1,4	3,1	0,4	0,7	0,6	2,2
18/09/12	1,4	3,4	0,4	0,8	0,7	2,4
19/09/12	1,2	3,1	0,4	0,7	0,7	2,3
20/09/12	1,2	3,2	0,4	0,7	0,7	2,3
21/09/12	1,2	3,2	0,4	0,7	0,7	2,4
22/09/12	1,1	3,0	0,4	0,7	0,6	2,2
23/09/12	1,1	2,9	0,4	0,7	0,6	2,1
24/09/12		2,3	0,3	0,5	0,6	2,0
25/09/12		1,7	0,3	0,8	0,6	2,0
26/09/12		1,9	0,3	0,7	0,5	1,8
27/09/12		0,1	0,3	0,7	0,6	2,0
28/09/12		0,3	0,3	0,7	0,6	1,9
29/09/12		0,1	0,3	0,6	0,6	1,9
30/09/12			0,3	0,7	0,6	1,8
01/10/12			0,3	0,6	0,5	1,8
02/10/12		1,0	0,3	0,6	0,5	1,7
03/10/12		0,1	0,3	0,7	0,5	1,8
06/11/12			0,3	0,5	0,4	1,6
07/11/12		1,0	0,3	0,6	0,5	1,7
08/11/12		1,1	0,3	0,7	0,5	1,9
09/11/12		0,8	0,3	0,5	0,4	1,4
10/11/12		1,0	0,3	0,6	0,5	1,8
11/11/12		0,8	0,3	0,5	0,4	1,4
12/11/12		0,9	0,3	0,5	0,4	1,4
13/11/12		0,7	0,2	0,4	0,3	1,2
14/11/12		0,8	0,2	0,4	0,3	1,3
15/11/12		1,1	0,3	0,6	0,5	1,9
16/11/12		1,1	0,3	0,6	0,5	1,8
17/11/12		1,3	0,3	0,6	0,5	1,9
18/11/12		1,2	0,3	0,5	0,5	1,7
19/11/12		1,0	0,2	0,4	0,4	1,5
20/11/12		0,9	0,2	0,4	0,4	1,3
21/11/12		1,2	0,3	0,5	0,4	1,5
22/11/12		0,9	0,2	0,4	0,3	1,2
23/11/12		1,2	0,3	0,5	0,4	1,6
24/11/12		1,4	0,3	0,6	0,5	1,9
25/11/12		1,4	0,3	0,6	0,5	1,9
26/11/12		1,1	0,3	0,6	0,5	1,7
27/11/12		0,7	0,2	0,3	0,3	1,0
28/11/12		0,8	0,2	0,4	0,3	1,1
29/11/12		0,9	0,2	0,4	0,3	1,1
30/11/12		1,0	0,2	0,4	0,3	1,2
01/12/12		0,9	0,2	0,3	0,3	1,0
02/12/12		0,8	0,2	0,3	0,3	0,9
03/12/12		0,9	0,1	0,3	0,2	0,8
04/12/12		1,5	0,2	0,5	0,4	1,4
05/12/12		1,4	0,2	0,5	0,4	1,3
06/12/12		1,6	0,3	0,5	0,4	1,4
07/12/12		1,7	0,3	0,5	0,5	1,6
19/06/13	0,2	0,8	1,1	1,3	0,2	1,1
20/06/13	0,2	0,8	1,2	1,3	0,2	1,1
21/06/13	0,2	0,9	1,3	1,4	0,2	1,3
22/06/13	0,2	1,0	1,4	1,5	0,3	1,3
23/06/13	0,2	0,9	1,4	1,5	0,3	1,4
24/06/13	0,3	1,0	1,4	1,6	0,5	1,5
25/06/13	0,3	1,0	1,4	1,6	0,4	1,5
26/06/13	0,3	1,1	1,4	1,6	0,3	1,5
27/06/13	0,3	1,1	1,5	1,6	0,3	1,5
28/06/13	0,4	1,1	1,4	1,6	0,3	1,5
29/06/13	0,4	1,1	1,4	1,7	0,3	1,5
30/06/13	0,4	1,1	1,5	1,7	0,3	1,5
01/07/13	0,5	1,1	1,5	1,7	0,4	1,5
02/07/13	0,5	1,1	1,4	1,5	0,3	1,4
03/07/13	0,5	1,0	1,4	1,5	0,2	1,3
04/07/13	0,5	1,1	1,5	1,7	0,3	1,6
05/07/13	0,5	1,1	1,4	1,7	0,4	1,6
06/07/13	0,5	1,4	1,5	1,8	0,4	1,6
07/07/13	0,6	1,4	1,5	1,8	0,4	1,6
08/07/13	0,6	1,4	1,4	1,7	0,4	1,6
09/07/13	0,7	1,4	1,5	1,7	0,4	1,5
10/07/13	0,7	1,4	1,4	1,7	0,3	1,5

11/07/13	0,7	1,3	1,4	1,6	0,2	1,4
12/07/13	0,7	1,4	1,4	1,6	0,3	1,4
13/07/13	0,7	1,4	1,4	1,6	0,2	1,4
14/07/13	0,7	1,3	1,3	1,5	0,2	1,3
15/07/13	0,6	1,3	1,3	1,5	0,2	1,3
16/07/13	0,6	1,3	1,3	1,5	0,2	1,3
17/07/13	0,6	1,2	1,3	1,5	0,2	1,3
18/07/13	0,6	1,3	1,4	1,6	0,2	1,4
19/07/13	0,6	1,2	1,4	1,5	0,2	1,4
24/01/17		0,5				0,4
25/01/17		0,4				0,3
26/01/17		0,9				0,7
27/01/17		0,8				0,6
28/01/17		0,6				0,5
29/01/17		0,9				0,7
30/01/17		1,0			0,1	0,8
31/01/17		1,0				0,8
01/02/17		1,1			0,1	0,9
02/02/17		0,9			0,1	0,8
03/02/17		1,0			0,1	0,8
04/02/17		1,0			0,1	0,8
05/02/17		0,8				0,7
06/02/17		0,9				0,7
07/02/17		1,1			0,1	0,9
08/02/17		0,8				0,6
16/02/18	0,1	0,5			0,1	0,6
23/02/18		0,3	0,3			0,4
23/04/18	0,1	0,6	0,3		0,1	0,6
23/02/18			0,3			
23/04/18			0,3	0,4		
21/05/18			0,5	1,3		
22/05/18	0,7	1,4	0,6	1,3		
23/05/18	0,8	1,5	0,6	1,4		
24/05/18	0,8	1,4	0,5	1,3		
25/05/18	0,8	1,4	0,5	1,2		
26/05/18	0,8	1,4	0,5	1,3		
27/05/18	0,8	1,4	0,5	1,2		
28/05/18	0,8	1,3	0,5	1,2		
29/05/18	0,8	1,4	0,5	1,2		
30/05/18	0,8	1,4	0,5	1,2		
31/05/18	0,5	1,4	0,5	1,3		
01/06/18	0,8	1,4	0,5	1,2		
02/06/18	0,9	1,4	0,5	1,3		
03/06/18	0,6	1,5	0,6	1,3		
04/06/18	0,4	1,3	0,5	1,2		
05/06/18	0,9	1,4	0,5	1,3		
06/06/18	0,4	1,4	0,6	1,3		
07/06/18	0,4	1,5	0,6	1,4		
08/06/18	0,4	1,3	0,5	1,2	0,1	1,1
09/06/18	0,9	1,4	0,5	1,3	0,1	1,1
10/06/18	0,6	1,4	0,5	1,3	0,1	1,1
11/06/18	0,6	1,4	0,5	1,3	0,1	1,1
12/06/18	0,4	1,4	0,5	1,3	0,1	1,1
13/06/18	0,3	1,5	0,6	1,4	0,1	1,2
14/06/18	0,3	1,5	0,6	1,4	0,1	1,2
15/06/18	0,3	1,6	0,6	1,5	0,1	1,3
16/06/18	0,2	1,6	0,6	1,5	0,1	1,3
17/06/18	0,2	1,7	0,7	1,6	0,1	1,4
18/06/18	0,2	1,8	0,8	1,8	0,1	1,6
19/06/18	0,2	1,7	0,7	1,7	0,1	1,5
20/06/18	0,3	1,7	0,7	1,6	0,1	1,5
21/06/18	0,3	1,6	0,7	1,6	0,1	1,4